

# Eau et territoires

Enjeux locaux pour une gestion  
transversale et résiliente

Elias Ganivet





# Eau et territoires

Enjeux locaux pour une gestion  
transversale et résiliente

Elias Ganivet

Éditions Quæ



## Thématique eau / territoires dans la collection Matière à débattre et décider

*Comment partager l'eau en France ? À l'ère de l'anthropocène*  
S. Bouarfa, M. Montginoul, T. Pelte, É. Sauquet, coord., 2025, 184 p.

*Trajectoires de transition écologique*  
*Vers une planification dynamique et adaptative des territoires*  
É. Briche, coord., 2023, 312 p.

*Quelles agricultures irriguées demain ?*  
*Répondre aux enjeux de sécurité alimentaire et du développement durable*  
S. Bouarfa, F. Brelle, C. Coulon, coord., 2020, 212 p.

*L'eutrophisation. Manifestations, causes, conséquences et prédictibilité*  
G. Pinay, C. Gascuel, A. Mènesguen, Y. Souchon, M. Le Moal, A. Levain, C. Etrillard,  
F. Moatar, A. Pannard, P. Souchu, auteurs, 2018, 176 p.

*Restaurer les milieux et prévenir les inondations grâce au génie végétal*  
F. Rey, auteur, 2018, 116 p.

### Pour citer cet ouvrage

Ganivet E., 2025. *Eau et territoires. Enjeux locaux pour une gestion transversale et résiliente*, Versailles, éditions Quæ, 200 p. (coll. Matière à débattre et décider).  
<https://doi.org/10.35690/978-2-7592-4157-6>

Les éditions Quæ réalisent une évaluation scientifique des manuscrits avant publication. La procédure d'évaluation est décrite dans Prism. Le processus éditorial s'appuie également sur un logiciel de détection des similitudes et des textes potentiellement générés par IA.

La diffusion en accès ouvert de cet ouvrage a été soutenue par la Banque des territoires de la Caisse des dépôts, la Fondation CNRS et l'association Water Family – Du flocon à la vague.

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  
[www.quae.com](http://www.quae.com) / [www.quae-open.com](http://www.quae-open.com)

© Éditions Quæ, 2025  
ISBN (papier) : 978-2-7592-4156-9  
ISBN (PDF) : 978-2-7592-4157-6  
ISBN (ePub) : 978-2-7592-4158-3  
ISSN : 2115-1229



# Sommaire

<b>Remerciements</b>	<b>5</b>
<b>Introduction</b>	<b>6</b>
<b>Partie 1. Comprendre les enjeux locaux de l'eau</b>	<b>11</b>
<b>1. Le cycle de l'eau</b>	<b>12</b>
Le bassin versant : le territoire de l'eau	12
Les stocks et flux d'eau au sein du cycle hydrologique	14
Évapotranspiration, infiltration et ruissellement : trois chemins possibles pour les précipitations	17
La variabilité saisonnière des différents flux d'eau	21
Le cas particulier du manteau neigeux et des glaciers	24
Les eaux souterraines	25
Circulation des eaux souterraines et échanges avec la surface	26
Les différents types de sécheresse	30
<b>2. Les facteurs affectant le cycle de l'eau</b>	<b>32</b>
Les facteurs physiques	32
Les facteurs biologiques	41
<b>3. Les impacts anthropiques et leurs conséquences physiques sur le cycle de l'eau</b>	<b>44</b>
Les prélèvements d'eau	44
Les usages de l'eau	51
Le petit cycle de l'eau	58
Les changements de couverture et d'usage des sols	60
L'aménagement des cours d'eau	68
Le changement climatique	75
Les interactions entre pressions climatiques et anthropiques	79
<b>4. Les conséquences sociales des pressions climatiques et anthropiques</b>	<b>81</b>
Les conséquences sociales du changement climatique	82
Les conséquences sociales des autres pressions anthropiques	83
Vers un effet cumulé des pressions climatiques et anthropiques	85

<b>Partie 2. Identifier des leviers d'action pour les territoires</b>	<b>86</b>
<b>5. Solutions sociales et politiques</b>	<b>88</b>
Utiliser et faire respecter le cadre législatif et réglementaire	88
Adapter la gouvernance locale	90
Questionner la capacité d'accueil du territoire	107
Adapter les modes de vie	112
Leviers économiques et incitations	114
Sensibiliser aux enjeux de l'eau	120
<b>6. Solutions fondées sur la nature</b>	<b>122</b>
Adaptation de l'urbanisation	124
Préservation et restauration des écosystèmes	126
Adaptation de l'agriculture	129
<b>7. Solutions techniques et technologiques</b>	<b>138</b>
Réutilisation des eaux usées	139
Amélioration des réseaux	143
Transferts d'eau entre territoires	144
Retenues collinaires	145
Réserves de substitution	147
Recharge artificielle des nappes	154
Désalinisation d'eau de mer	157
 <b>Partie 3. Partager les connaissances avec « Trajectoire eau et territoire »</b>	 <b>161</b>
<b>8. L'intégration des connaissances locales au sein de l'outil</b>	<b>163</b>
Le plateau	164
Les cartes	165
Les cubes	167
<b>9. Retours d'expérience des ateliers « Trajectoire eau et territoire »</b>	<b>169</b>
Ce qui marque	170
Les principales vulnérabilités identifiées	171
Les principales solutions retenues	171
<b>Conclusion</b>	<b>173</b>
<b>Liste des abréviations</b>	<b>174</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>176</b>
<b>Crédits iconographiques</b>	<b>199</b>

# Remerciements

En premier lieu, je tiens à grandement remercier l'ensemble des partenaires financiers ayant contribué à l'aboutissement de ce travail de recherche : la Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires (MITI) du CNRS au titre du projet 80 Prime, l'Agence nationale de la recherche (ANR) au titre du projet ANR-SAPS-RA-RP1 2022, l'Agence de l'eau Adour-Garonne au titre du projet Éduc'Eau, et CNRS Innovation au titre du projet PISE. La publication en accès ouvert de cet ouvrage, quant à elle, a bénéficié d'un soutien financier de la part de la Banque des territoires de la Caisse des dépôts, de la Fondation CNRS et de l'association Water Family – Du flocon à la vague.

Ensuite, je tiens à sincèrement remercier Laurent Longuevergne (CNRS) et Véronique Van Tilbeurgh (Université Rennes 2), pour leur accompagnement dans l'encadrement de mon travail de thèse ayant conduit à la rédaction de cet ouvrage. Je tiens aussi à remercier l'ensemble des membres du jury ayant évalué ce travail de thèse : Agathe Euzen (CNRS), Denis Salles (INRAE), Olivier Barreteau (INRAE), Pascal Goderniaux (Université de Mons), Régis Barraud (Université de Poitiers), Mélanie Congretel (Université Rennes 2) et Thomas Houet (CNRS). Merci aux personnes ayant, par leur relecture partielle, contribué à améliorer cet ouvrage : Alexandre Coche (CNRS), Ronan Abhervé (INRAE), François Gauchery (INRAE), Emmanuelle Hellier (Université Rennes 2). Je remercie également l'ensemble des personnes ayant participé à des ateliers « Trajectoire eau et territoire » et dont les questions, remarques et suggestions ont grandement contribué à faire évoluer l'outil et le contenu de cet ouvrage. De plus, je souhaite remercier les agents de Lorient Agglomération (où ce travail fut initié) — et tout particulièrement Olivier Priolet et Gwenvaël Le Guisquet — pour leur accueil et leur accompagnement nous ayant conduit au projet conjoint Interreg Blue Transition. Enfin, un grand merci aux trois relecteurs anonymes ayant accepté d'évaluer ce travail et dont les commentaires ont fortement concouru à améliorer la qualité de ce manuscrit.

# Introduction

Nous vivons une époque où l'ampleur des bouleversements environnementaux impose à l'ensemble des territoires (faisant ici référence à une échelle locale) de faire face à de nouvelles responsabilités écologiques. Le changement climatique, en particulier, est une des pressions au centre de l'attention politique et médiatique depuis ces dernières années. Ses conséquences, et notamment l'accentuation (en intensité et en fréquence) d'événements extrêmes liés à l'eau, ont particulièrement mis en lumière la grande vulnérabilité des territoires. À titre d'exemple, en France métropolitaine, la sécheresse de 2022 a eu de lourds impacts sur l'alimentation en eau potable (ruptures d'approvisionnement<sup>1,2</sup>), l'agriculture (pertes de rendement) (Insee, 2023) et les écosystèmes (assèchement des rivières et perte de biodiversité). Pourtant, cet épisode considéré comme extrême pourrait être un épisode moyen d'ici à 2050 (Météo-France, 2022). À l'opposé, de nombreuses régions françaises se sont ensuite retrouvées confrontées à des phénomènes d'inondations catastrophiques en 2023, 2024 et 2025.

De fait, il apparaît de plus en plus évident que le nouveau contexte hydroclimatique qui se met en place pourrait causer des impacts irréversibles, en poussant les activités humaines et les écosystèmes au-delà de leur limite d'adaptation (Arambourou *et al.*, 2025). Cette évolution questionne ainsi dès aujourd'hui les règles de gestion et de partage de l'eau (Salles, 2022 ; Bouarfa *et al.*, 2025) — l'approche actuelle s'appuyant sur des hypothèses de stabilité et d'abondance fortement compromises (Milly, 2008). En changeant de contexte (accentuation des périodes avec soit trop d'eau, soit pas assez d'eau), c'est le référentiel même de cette gestion quantitative qui est questionné. Le défi est donc vertigineux : il faut définir dès aujourd'hui des trajectoires plus résilientes (The Shift Project, 2022) — c'est-à-dire identifier des leviers locaux d'adaptation, afin de rendre les territoires plus robustes face aux changements (Hamant, 2023).

Cependant, s'il existe une certaine prise de conscience des bouleversements en cours, nos sociétés ont généralement tendance à considérer de manières indépendantes les unes des autres les questions que ces bouleversements posent. Par exemple, de nombreux discours politiques et médiatiques tendent à envisager ces pressions sous l'angle exclusivement climatique, réduisant par là même pour l'essentiel les activités humaines à des flux de gaz à effet de serre. Ce prisme conduit ainsi à une singularisation et une hiérarchisation des enjeux, excluant de fait d'autres enjeux environnementaux. Cela questionne les politiques d'adaptation à apporter, dans la mesure

1. <https://www.ouest-france.fr/bretagne/botmeur-29690/secheresse-ce-village-du-finistere-commande-des-camions-citernes-en-urgence-pour-ne-pas-etre-a-sec-86f5df82-18ba-11ed-9419-c6323ddb2580> (consulté le 18/08/2025).

2. <https://www.ledauphine.com/environnement/2022/07/21/haute-savoie-les-sources-a-sec-les-habitants-ravitailles-en-eau-potable-a-sappey-et-vovray-en-bornes> (consulté le 18/08/2025).

où le changement climatique ne représente qu'une pression additionnelle (bien que significative) sur des territoires déjà fortement impactés par l'ensemble des autres pressions d'origine anthropique (incluant, par exemple, les usages de l'eau, l'urbanisation, les pratiques agricoles...). Ce constat invite par conséquent à prendre du recul et changer de perspective, pour intégrer une vision d'ensemble des pressions climatiques et anthropiques affectant les territoires — c'est-à-dire adopter une approche plus systémique et transversale.

Une telle approche transversale semble ainsi indispensable pour dépasser une conception de toutes les pressions affectant les ressources en eau comme des sujets indépendants, pouvant se résoudre par des approches réductionnistes et appelant une réponse unique (généralement technique), au risque de maladaptations (c'est-à-dire que le remède pérennise, voire aggrave, le risque qu'il est supposé résoudre) (Bertana *et al.*, 2022). Si l'absence de transversalité pouvait ne pas poser de problème majeur dans un contexte d'abondance, cela semble en revanche relativement inadapté au nouveau contexte hydroclimatique — imposant de fait une transversalité sous contrainte. Ce manque de cohérence dans les politiques publiques était d'ailleurs également souligné par un rapport de la Cour des comptes datant de mars 2023 et qui relevait « une organisation inadaptée aux enjeux de la gestion quantitative de l'eau ».

L'adaptation des territoires est donc devenue un enjeu majeur à l'échelle nationale, donnant notamment lieu à l'élaboration de nombreux documents de planification. Cependant, une ambition de « Préparer la France à + 4 °C »<sup>3</sup>, comme le titre un de ces documents, n'informe pas précisément les acteurs locaux sur les changements attendus dans leur territoire. Chaque territoire possédant des caractéristiques biophysiques (climat, géologie, relief, sol...) et sociales (activités économiques, usages de l'eau et des sols...) différentes, il y a un besoin de recentrer les questions d'adaptation à une échelle plus locale (communes, intercommunalités, bassins de vie...). Adopter une approche plus systémique et transversale à l'échelle locale vise également à redonner aux acteurs locaux une capacité à agir en faveur de l'adaptation de leur territoire, là où la thématique du changement climatique seule (appelant une approche mondiale) peut parfois générer un sentiment d'impuissance sur place. En effet, de nombreux leviers d'action locaux (touchant à l'ensemble des autres pressions anthropiques mentionnées précédemment, telles qu'usages de l'eau, urbanisation, pratiques agricoles, modes de vie, attractivité du territoire...) existent dans le but de rendre les territoires plus résilients.

Les successions d'événements extrêmes de ces dernières années ont toutefois mis en lumière un important manque d'anticipation à l'échelle des territoires — constat partagé par un rapport interministériel dressant un retour d'expérience de la gestion de l'eau lors de la sécheresse 2022 (Bertrand *et al.*, 2023). Ce niveau d'impréparation

3. [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/20241025\\_DP\\_PNACC3.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/20241025_DP_PNACC3.pdf) (consulté le 18/08/2025).

face aux successions d'extrêmes renforce ainsi le constat que les décisions ont tendance à survenir principalement afin de répondre à l'urgence (politiques curatives plutôt que préventives)<sup>4</sup>. Il devient donc indispensable de mieux prendre en compte, dans l'action publique, les pressions futures (changement climatique, urbanisation, agriculture, prélèvements d'eau...). Pourtant, il ne semble désormais plus y avoir de problème de connaissances pour mettre en œuvre des politiques d'adaptation (Boyd *et al.*, 2015). C'est donc principalement une question de choix sociétaux et d'orientation de l'action publique.

Par ailleurs, l'absence de mise en action questionne également directement le rôle de la science, notamment du fait de la disponibilité d'outils et connaissances permettant de réduire les incertitudes dans les décisions publiques. Cependant, il s'agit d'approches généralement techniques, se prêtant difficilement au partage de connaissances auprès des acteurs des territoires. Dans ce contexte, le risque est que l'accumulation de connaissances scientifiques serve principalement à « la contemplation des désastres » plutôt qu'à permettre d'accompagner réellement les territoires dans une transition socioécologique. De ce fait, il apparaît aussi nécessaire de redéfinir la manière dont les connaissances et les résultats de la recherche peuvent contribuer à la construction de connaissances partagées et permettre de renforcer les décisions publiques locales.

Pour finir, les évolutions hydroclimatiques génèrent également de plus en plus de tensions dans l'espace public entre les différentes catégories d'usagers. Bien que ces tensions ne soient pas récentes, leurs fréquences et leurs intensités semblent s'accroître, comme en témoignent de récents conflits (« mégabassines », retenues collinaires...). Cela montre, tout d'abord, l'absence de consensus concernant les modalités de gestion de l'eau, ainsi que le besoin de dialogue et de concertation afin d'engager une réflexion démocratique sur son partage — là où l'approche actuelle a généralement tendance à exclure la société civile (Legros, 2024). Dans ce contexte, il apparaît également nécessaire de favoriser une mise en débat du sujet avec l'ensemble des acteurs composant chaque territoire. Tout le monde ayant besoin d'eau, cette thématique offre ainsi l'opportunité, à travers un objet unique, de croiser de nombreux enjeux associés (climat, biodiversité, activités humaines...) et de rassembler de nombreux acteurs locaux (décideurs, habitants, associations, agriculteurs, entreprises...).

Cet ouvrage s'insère ainsi dans le contexte d'un travail de recherche toujours en cours et visant à répondre en partie à tous ces enjeux. Il fut initié dans le cadre d'une thèse de doctorat (Ganivet, 2023) — menée de 2020 à 2023 — dont l'objectif était de concevoir une démarche et des outils permettant :

- d'aider à mieux comprendre les enjeux locaux de l'eau ;
- de se projeter sur l'état de la ressource et sa répartition future ;
- et de définir collectivement des trajectoires souhaitables pour les territoires.

4. [https://www.lemonde.fr/idees/article/2024/04/08/le-deni-francais-face-aux-menaces-sur-l-eau\\_6226651\\_3232.html](https://www.lemonde.fr/idees/article/2024/04/08/le-deni-francais-face-aux-menaces-sur-l-eau_6226651_3232.html) (consulté le 18/08/2025).

Appliquée en Bretagne — sur le territoire de Lorient Agglomération et des bassins versants du Scorff et du Blavet —, la méthodologie expérimentée était : interdisciplinaire par l'implication de chercheurs et d'approches issus des sciences naturelles et des sciences sociales ; participative par l'implication (lors d'ateliers) d'une diversité d'acteurs locaux (usagers, gestionnaires, élus...) ; et anticipative par l'usage d'outils de modélisation et de scénarios, afin de confronter ces acteurs à la possible situation future et d'identifier des leviers d'adaptation pour leur territoire (Ganivet *et al.*, 2024a).

Dans ce cadre, cet ouvrage propose une synthèse (et un approfondissement) de la thèse de doctorat dont ce travail est issu, afin de rendre plus facilement accessibles ces connaissances au plus grand nombre. Il s'adresse aux décideurs et, plus généralement, à toute personne souhaitant mieux comprendre les enjeux (quantitatifs) de l'eau à l'échelle de son territoire (en France métropolitaine). De fait, cette synthèse de connaissances offre une vision relativement systémique (ou transversale), en mobilisant à la fois les aspects biophysiques et sociaux associés à l'eau :

- le fonctionnement naturel du cycle de l'eau (bassin versant, stocks, flux...) ;
- les impacts des activités humaines (prélèvements et usages de l'eau, changements de couverture des sols...) et leurs conséquences physiques sur le cycle de l'eau ;
- leurs conséquences sociales ;
- et enfin les potentiels leviers d'action locaux pouvant être mobilisés afin de rendre les territoires plus résilients (solutions sociales, fondées sur la nature, et techniques).

Ce faisant, ce livre vise à rassembler au sein d'un ouvrage unique des connaissances qui sont généralement fragmentées au sein de multiples sources. Enfin, il vise également à mettre plus en lumière la dimension souterraine des ressources en eau — élément invisible qui est souvent très mal représenté (voire absent) dans l'imaginaire collectif et dans nombre d'ouvrages sur l'eau.

Il est néanmoins important de noter qu'il reste imparfait, et que la vision d'ensemble proposée ici ne prétend pas aborder tous les enjeux de l'eau de manière universelle — c'est-à-dire qui serait systématiquement adaptée au particularisme de chaque territoire. Cette synthèse de connaissances se voulant la plus compréhensive possible, certains éléments présentés sont également parfois simplifiés vis-à-vis de leur complexité et pourraient ne pas toujours correspondre à la situation de tous les territoires. Un traitement au cas par cas n'étant pas ici l'objectif, il appartient au lecteur de bien identifier les spécificités du territoire l'intéressant. De plus, cet ouvrage se concentre majoritairement sur les aspects quantitatifs de l'hydrologie et de la gestion de l'eau. Ce choix s'explique par le fait que, jusqu'à récemment, ces enjeux n'étaient que faiblement pris en compte dans de nombreux territoires de France métropolitaine — là où les aspects de qualité et de pollution de l'eau étaient historiquement plus mis en avant. En revanche, les enjeux de qualité d'eau et leurs conséquences — sujet tout aussi important — sont actuellement en cours de développement pour venir compléter cette démarche à l'avenir.

Enfin, au-delà de cet ouvrage, les connaissances mobilisées ici peuvent également être partagées sous forme d'ateliers participatifs à l'aide de l'outil de médiation « Trajectoire eau et territoire »<sup>5</sup> (et d'un outil associé : le « Kit de sensibilisation des élus aux enjeux de l'eau »<sup>6</sup>). Dans ce contexte, cet ouvrage fournit ainsi quelques détails concernant la manière dont cet outil permet de faciliter la compréhension des enjeux locaux de l'eau — l'idée étant que ces ateliers participatifs s'organisent en suivant les différentes thématiques abordées tout au long de cet ouvrage. Il propose également une synthèse des retours d'expérience issus du déploiement de cet outil à l'échelle nationale. L'expérience issue de ces ateliers est d'ailleurs à l'origine de certaines thématiques abordées au sein de cet ouvrage — permettant de répondre à des questionnements courants des participants.

---

5. <https://eau-et-territoire.org/trajectoire> (consulté le 18/08/2025).

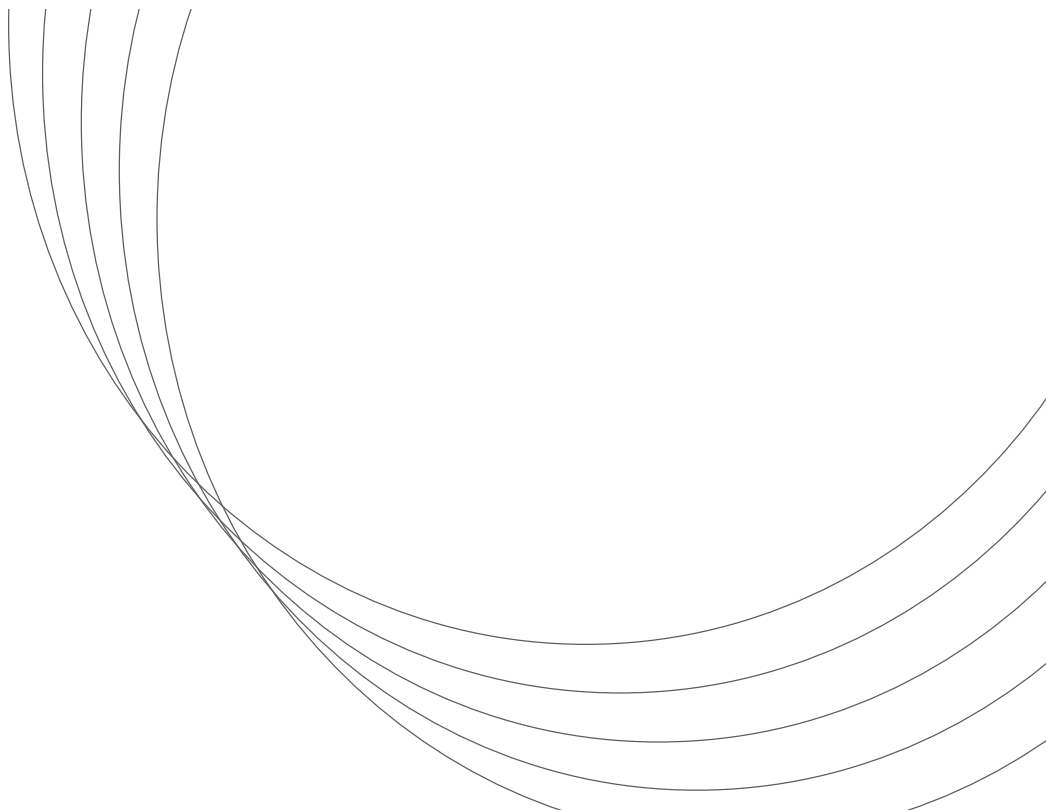
6. <https://aquagir.fr/tout-savoir-sur-leau/kit-sensibilisation-elus-enjeux-eau> (consulté le 18/08/2025).



# Partie 1

## Comprendre les enjeux locaux de l'eau

Aboutir à des territoires plus résilients nécessite au préalable de disposer d'une compréhension suffisamment bonne des processus affectant le cycle de l'eau à l'échelle locale. Dans ce but, cette partie synthétise, dans un premier temps, un ensemble de connaissances inhérentes au fonctionnement du cycle de l'eau au sein des contextes retrouvés en France métropolitaine. Dans un second temps, elle explore les conséquences, à la fois sur le cycle de l'eau puis sur la société, de différents impacts des activités humaines.



# 1. Le cycle de l'eau

## Le bassin versant : le territoire de l'eau

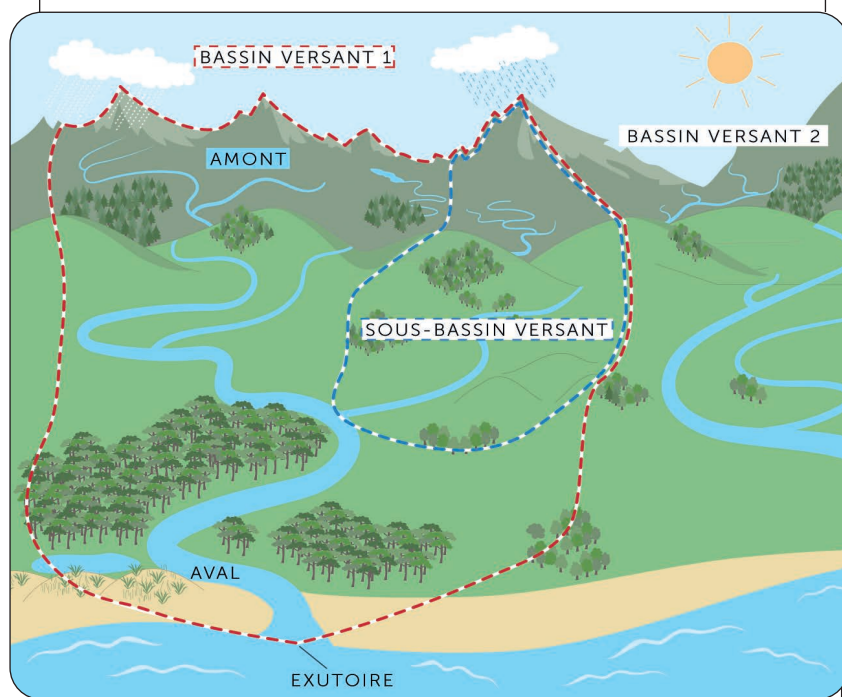
La notion de « bassin versant » constitue un des concepts fondamentaux du cycle de l'eau à l'échelle continentale (Brutsaert, 2005 ; Schaffner *et al.*, 2021). Un bassin versant correspond à une portion d'espace terrestre à l'intérieur de laquelle les eaux issues des précipitations s'écoulent naturellement (en surface et dans le milieu souterrain) vers un même point nommé « exutoire » (cours d'eau, lac ou océan) (Uereyen et Kuenzer, 2019). Chaque bassin versant est délimité par ce qu'on appelle des « lignes de partage des eaux » — frontières naturelles généralement dessinées par le relief et correspondant aux lignes de crête (fig. 1.1). Évidentes lorsque le relief est marqué, comme en montagne, elles sont en revanche plus difficiles à identifier dans les secteurs de plaine. Ainsi, les précipitations tombant d'un côté ou de l'autre de cette ligne de partage des eaux alimenteront deux bassins versants situés côte à côte. Pour des raisons de simplification (et par abus de langage), c'est généralement uniquement cette délimitation topographique qui est utilisée pour définir les « bassins versants ». En réalité, les conditions géologiques peuvent également parfois induire des transferts d'eau interbassins par des flux souterrains, modifiant de fait la ligne de partage des eaux. Ainsi, un bassin versant n'est, en pratique, pas toujours délimité strictement par sa topographie (ou alors on parle de « bassin versant topographique »), bien qu'il s'agisse d'une hypothèse simplificatrice courante.

Le bassin versant se compose ensuite d'une rivière principale prenant sa source généralement sur les hauteurs (à l'amont), au niveau de ce qui est appelé la « tête de bassin », puis s'écoulant (suivant le relief, dans le fond de la vallée) en collectant l'eau de ses affluents pour rejoindre l'océan ou se jeter dans un autre cours d'eau, au niveau de son exutoire (à l'aval). Les bassins versants de grandes tailles sont ainsi composés de l'assemblage des sous-bassins versants de leurs affluents. Selon un motif arborescent, les bassins versants forment des continuités hydrographiques reliant tous les écoulements jusqu'aux mers et aux océans. Par extension, ils constituent également des continuités écologiques (corridors biologiques) — distribuant les habitats d'une part importante des écosystèmes.

Cette vision « bassin versant » est indispensable, car chaque bassin présente des caractéristiques uniques (taille, orientation, réseau hydrographique, relief, climat, géologie, couverture des sols...). De plus, une problématique majeure est que les frontières politiques et administratives ne coïncident généralement jamais avec les limites hydrologiques des bassins versants (sauf éventuellement lorsque la ligne de frontière est également une ligne de crête). À titre d'exemple, dans la partie sud-ouest de la France,

les bassins côtiers basques sont situés à cheval entre deux pays, tandis que le bassin versant de l'Adour, en plus de déborder légèrement sur le territoire espagnol, recoupe les limites administratives de quatre départements (fig. 1.2). Aussi, les questions du partage de toutes les formes de ressources liées à l'eau peuvent générer des tensions (Unep-DHI, Unep, 2016) — notamment entre territoires en amont qui prélèvent (aménagements hydrauliques, irrigation...), voire polluent la ressource, et territoires tributaires en aval. Le partage des eaux souterraines entre limites administratives pose également des problèmes spécifiques<sup>7</sup>. Pour cette raison, il est indispensable, dans la gestion des ressources en eau, de prendre en compte cette échelle hydrologique du « bassin versant », là où les limites administratives (que ni les cours d'eau ni les eaux souterraines ne connaissent) sont beaucoup moins pertinentes.

**Figure 1.1.** Représentation schématique d'un bassin versant (topographique) et son sous-bassin versant délimités par leurs lignes de partage des eaux.

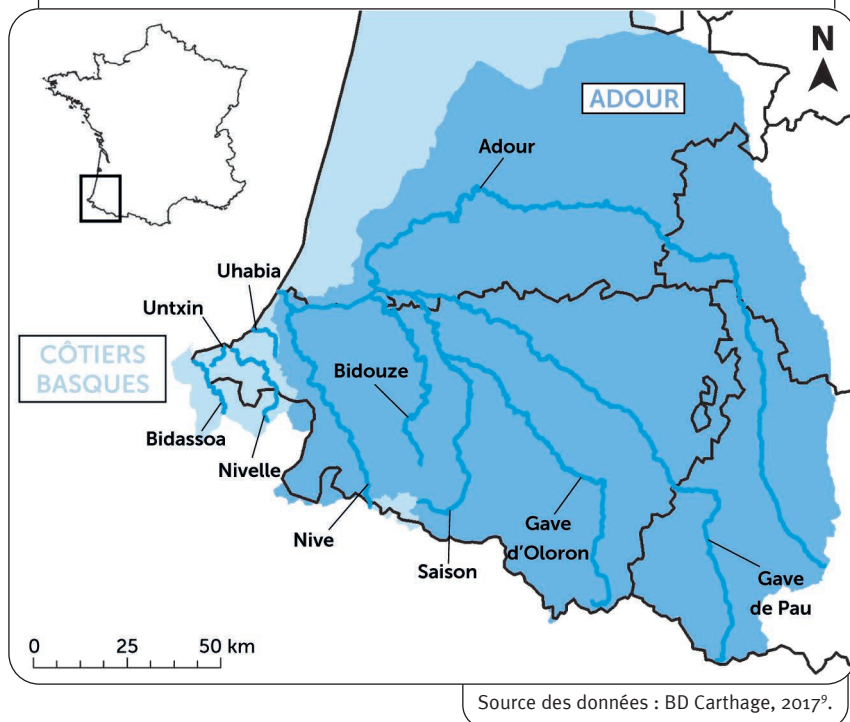


Source : © Water Family, adapté de l'Office français de la biodiversité (OFB) / Matthieu Nivesse (d'après OIEau)<sup>8</sup>.

7. <https://www.un-igrac.org/resource/transboundary-aquifers-world-map-2021> (consulté le 18/08/2025).

8. <https://www.eaufrance.fr/leau-et-les-milieux-aquatiques> (consulté le 18/08/2025).

**Figure 1.2.** Mise en perspective des limites hydrologiques du bassin versant de l'Adour et des bassins côtiers basques avec les limites administratives (traits noirs) des départements des Pyrénées-Atlantiques, des Hautes-Pyrénées, du Gers et des Landes (sud-ouest de la France).

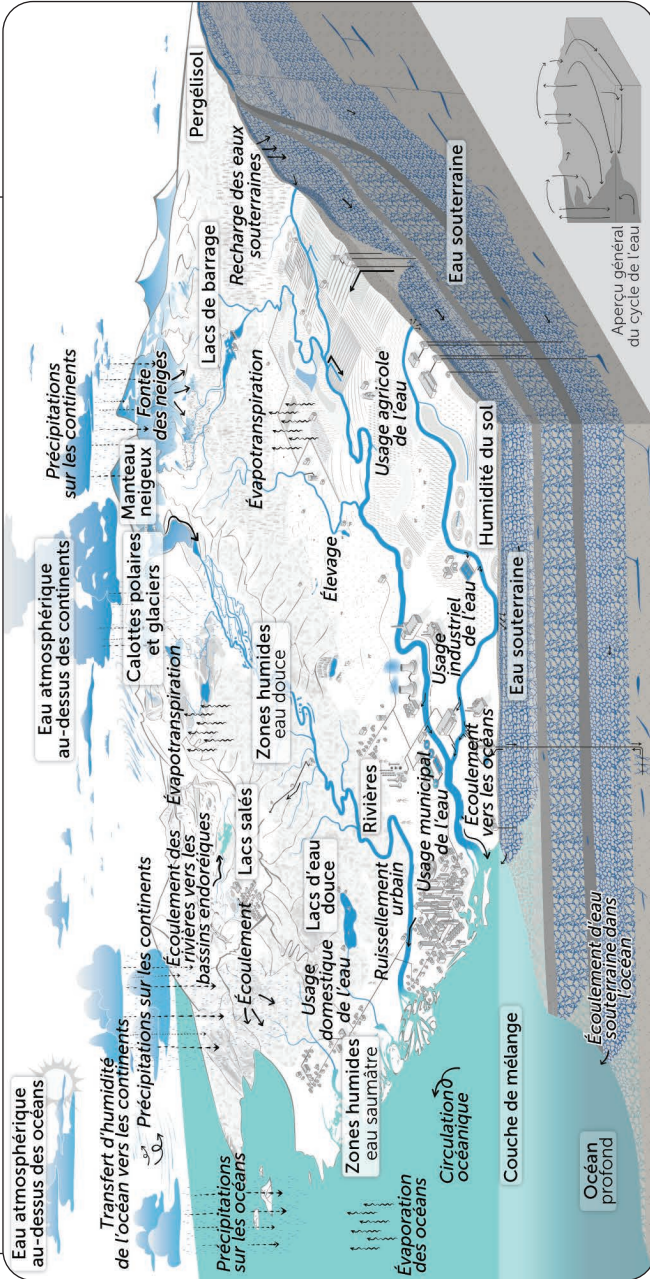


## Les stocks et flux d'eau au sein du cycle hydrologique

L'eau existe sous trois états physiques : solide, liquide et gazeux. Elle circule et se transforme dans l'atmosphère, à la surface de la Terre et dans le milieu souterrain, suivant différents processus naturels qui constituent tous ensemble ce qu'on appelle le « cycle de l'eau ». Ce cycle de l'eau correspond ainsi à un ensemble des flux physiques (transferts) d'eau entre différents stocks (réservoirs) à l'échelle globale, comme représenté sur un diagramme proposé par l'Institut d'études géologiques des États-Unis (fig. 1.3).

9. <https://www.sandre.eaufrance.fr/atlas/srv/fre/catalog.search#/metadata/deafc1b2-0d2e-4552-ad22-0227ffd77b3> (consulté le 18/08/2025).

**Figure 1.3.** Représentation du cycle de l'eau produit par l'Institut d'études géologiques des États-Unis (U.S. Geological Survey).



Source : Corson-Dosch et al., 2023, <https://pubs.usgs.gov/publication/gip221>.

Selon la littérature scientifique (Abbott *et al.*, 2019), un grand nombre de zones de stockage transitoire d'eau sont généralement renseignées parmi les diagrammes représentant le cycle de l'eau. Ils correspondent aux différents compartiments dans lesquels se retrouve l'eau sous toutes ses formes sur Terre. Parmi les principaux, nous retrouvons : l'atmosphère, comprenant de l'eau sous forme gazeuse ; l'océan, les cours d'eau, les plans d'eau, les zones humides, le sol (humidité du sol) et les eaux souterraines, comprenant de l'eau sous forme liquide ; et le manteau neigeux et les glaciers (ainsi que certains sols gelés en permanence, appelés pergélisols), comprenant de l'eau sous forme solide. Ces stocks peuvent en outre être variables d'un territoire à l'autre : par exemple, en France, le « manteau neigeux » concernera principalement des territoires de montagne.

Ces stocks sont ensuite reliés par des flux physiques d'eau. Pour des raisons de simplification, seulement une partie de ces flux est représentée ici, en opérant parfois certains regroupements. En particulier, l'objectif étant de représenter le cycle de l'eau dans les territoires (c'est-à-dire sur la partie terrestre), certains éléments de la partie océanique seront volontairement érudés. Ainsi, les principaux flux seront résumés ici par : les précipitations ; le ruissellement ; l'infiltration ; l'évapotranspiration ; et les échanges entre nappes et surface. Si différentes définitions peuvent parfois exister pour ces termes, nous nous référons ici à celles proposées par le « Glossaire sur l'eau, le milieu marin et la biodiversité »<sup>10</sup> piloté et animé par l'Office international de l'eau (OiEau)<sup>11</sup>. Par exemple, le ruissellement est défini ici comme l'eau s'écoulant à la surface du sol et des versants<sup>12</sup>. L'infiltration, quant à elle, fait référence à l'eau franchissant la surface du sol et rechargeant les nappes souterraines<sup>13</sup> : il s'agit donc ici de l'eau infiltrée n'étant pas captée par la végétation. Enfin, l'évapotranspiration est, comme son nom l'indique, le résultat de deux phénomènes : l'évaporation de l'eau en surface et dans les sols (comprenant également l'eau interceptée par les parties aériennes des végétaux puis évaporée) ; et la transpiration du vivant — surtout la végétation (ce flux intègre donc aussi la part d'eau infiltrée dans les sols, mais qui est captée puis transpirée par la végétation)<sup>14</sup>.

Les aspects généraux du cycle de l'eau (évaporation sur les océans, formation de nuages et précipitation sur les continents, puis écoulement des rivières jusqu'aux océans) étant généralement connus de tous, nous nous concentrerons ici sur des aspects souvent peu mis en avant, mais pourtant fondamentaux : les précipitations et leur partitionnement au sein de différents flux d'eau ; la variabilité saisonnière de ces différents flux ; le cas particulier du stockage sous forme de manteau neigeux ; les processus impliquant les eaux souterraines et leur contribution au soutien des rivières et au maintien de conditions humides en surface ; et les conséquences de la multiplicité de ces chemins de l'eau sur différents types de sécheresses.

10. <https://glossaire.eauetbiodiversite.fr> (consulté le 18/08/2025).

11. <https://www.oieau.org> (consulté le 18/08/2025).

12. <https://glossaire.eauetbiodiversite.fr/concept/ruissellement> (consulté le 18/08/2025).

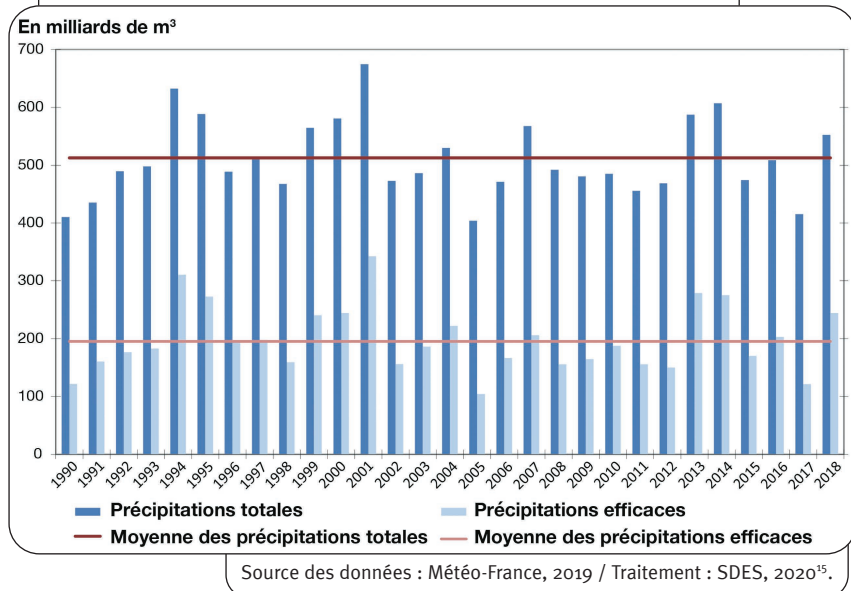
13. <https://glossaire.eauetbiodiversite.fr/concept/infiltration> (consulté le 18/08/2025).

14. <https://glossaire.eauetbiodiversite.fr/concept/evapotranspiration> (consulté le 18/08/2025).

## Évapotranspiration, infiltration et ruissellement : trois chemins possibles pour les précipitations

Les précipitations sont un élément indispensable à l'approvisionnement en eau des territoires. À l'échelle nationale, un cumul moyen d'environ 900 mm (~ 503 milliards de mètres cubes) de précipitations (pluie et neige) est observé chaque année. Cependant, ces précipitations peuvent être extrêmement variables d'une année à l'autre (fig. 1.4) et d'un territoire à l'autre (fig. 1.5) — résultat de différents facteurs à la fois climatiques et géographiques. Par exemple, annuellement, il tombe en moyenne autour de 600 mm de précipitations à Perpignan, contre 1 500 mm à Biarritz (et jusqu'à plus de 2 000 mm dans certaines zones montagneuses). Une fois arrivée au sol, l'eau issue de ces précipitations se répartit au sein de trois chemins (flux) possibles : l'évapotranspiration, le ruissellement et l'infiltration (recharge des nappes). Ce partitionnement sera dépendant de nombreuses caractéristiques physiques locales (voir section « Les facteurs physiques affectant le cycle de l'eau ») et pourra être relativement variable en fonction de l'échelle temporelle étudiée (évènementielle, mensuelle, annuelle...).

**Figure 1.4.** Évolution annuelle du volume des précipitations totales et des précipitations efficaces en France entre 1990 et 2018.

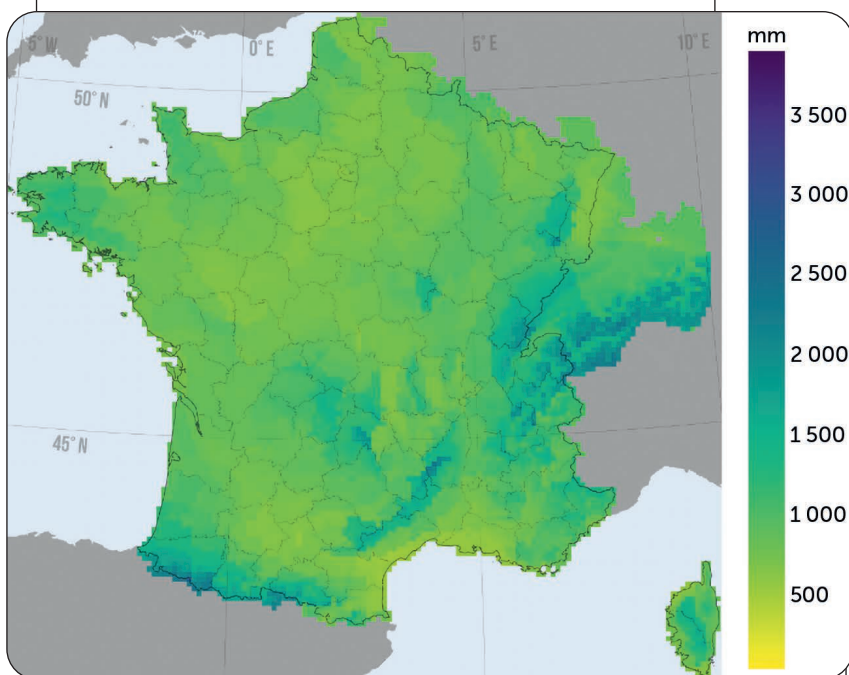


15. <https://www.notre-environnement.gouv.fr/rapport-sur-l-etat-de-l-environnement/themes-ree/pressions-exercees-par-les-modes-de-production-et-de-consommation/prelevements-de-ressources-naturelles/eau-douce/article/les-precipitations-et-l-eau-disponible> (consulté le 18/08/2025).



De manière simplifiée, ce partitionnement sera résumé ici sous forme de bilan d'évolution à l'échelle annuelle puis saisonnière (fig. 1.6) — un exercice connu sous le nom de « bilan hydrologique »<sup>16</sup>. Tout d'abord, une grande partie de l'eau tombant au sol retourne dans l'atmosphère par évapotranspiration : captée, puis transpirée par la végétation (ou évaporée dans les sols et en surface), cette eau ne bénéficie donc ni aux milieux aquatiques de surface ni aux nappes souterraines (et, *a fortiori*, ni aux besoins anthropiques). Au niveau national, ce flux (nécessaire à la végétation) mobilise environ 60 % des précipitations annuelles. La partie restante (c'est-à-dire environ 40 % des précipitations annuelles) ruisselle à la surface du sol ou s'infiltre au-delà et recharge les eaux souterraines : elle constitue ce qui est appelé « les précipitations (ou pluies) efficaces »<sup>17</sup>. Ainsi, à l'échelle nationale, seul un peu plus d'un tiers des précipitations est considéré comme « efficace » et alimente donc les cours d'eau et les nappes souterraines annuellement (voir fig. 1.4).

**Figure 1.5.** Carte des précipitations totales annuelles moyennes (en mm) en France sur la période 2010-2020.



Source des données : Météo-France, 2023<sup>18</sup> / Infographie : © Alexandre Coche, 2024.

16. <https://glossaire.eauetbiodiversite.fr/concept/bilan-hydrologique> (consulté le 18/08/2025).

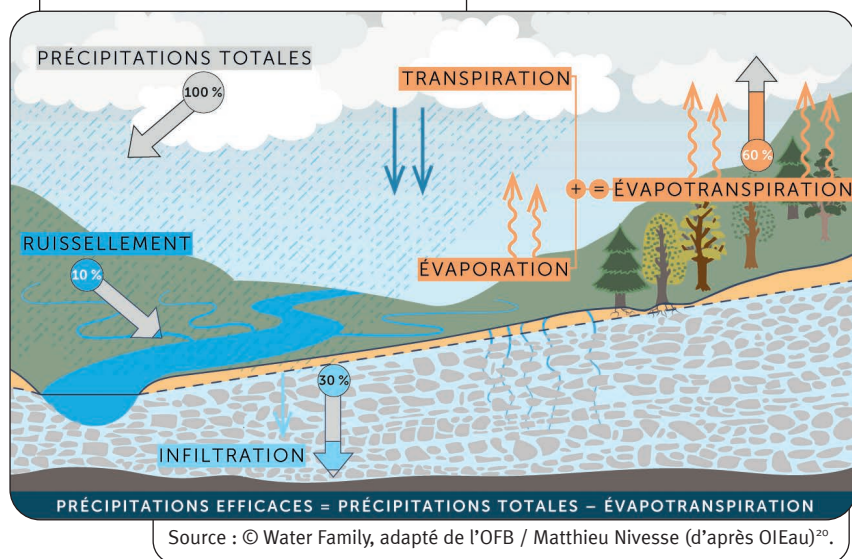
17. <https://glossaire.eauetbiodiversite.fr/concept/pluie-efficace> (consulté le 18/08/2025).

18. <https://meteo.data.gouv.fr> (consulté le 18/08/2025).



Enfin, ces 40 % restants de précipitations annuelles efficaces se répartissent, en moyenne (toujours à l'échelle nationale), avec 10 % ruisselant directement en surface et environ 30 % s'infiltrant pour recharger les nappes. La majorité de cette eau rechargeant les nappes rejoindra les eaux de surface, après un stockage transitoire au sein des milieux souterrains (voir section « Circulation des eaux souterraines et échanges avec la surface »). Il est important de noter qu'en France le volume moyen d'eau renouvelable (c'est-à-dire principalement de précipitations efficaces) a diminué de presque 15 % en vingt ans (– 33 milliards de mètres cubes en comparant la période 1990-2002 à la période 2002-2018), essentiellement du fait d'une diminution des précipitations, couplée à une augmentation de l'évapotranspiration à toutes les saisons, favorisée par des températures plus élevées<sup>19</sup>.

**Figure 1.6.** Les précipitations efficaces.



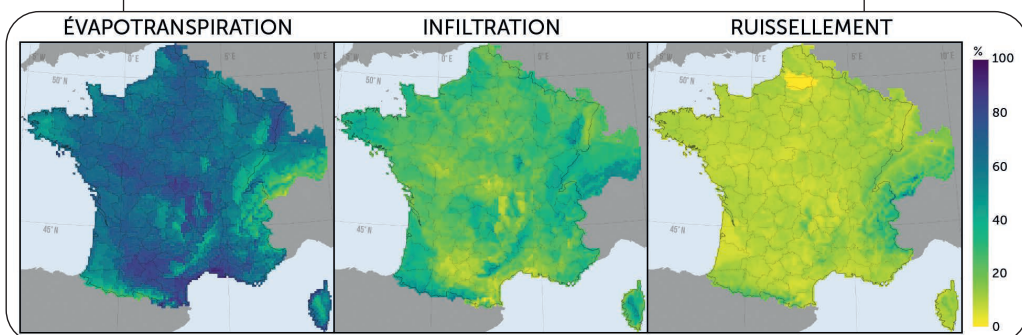
Ce partitionnement annuel moyen des flux à l'échelle nationale cache néanmoins des disparités entre les territoires (fig. 1.7). Tout d'abord, l'évapotranspiration, bien que captant généralement de 50 à 70 % des précipitations annuelles sur une majorité des territoires, peut varier beaucoup plus dans certains cas particuliers. Une proportion plus faible (captant de 30 à 50 % des précipitations) est tout particulièrement

19. <https://www.notre-environnement.gouv.fr/donnees-et-ressources/ressources/infographies/article/la-ressource-en-eau-renouvelable-en-france-metropolitaine> (consulté le 18/08/2025).

20. <https://www.eaufrance.fr/les-precipitations-efficaces> (consulté le 18/08/2025).

observée sur les massifs montagneux (Alpes, Pyrénées, Massif central, Vosges, Jura, Morvan, monts d'Arrée...). En effet, les possibilités d'évapotranspiration au sein de ces zones sont nécessairement plus faibles qu'en plaine, du fait d'un climat plus frais, de la présence d'une végétation transpirant moins (prairies de montagnes, forêts de conifères...), combinés à une plus forte abondance de surfaces minérales (roches, falaises, pierriers...), ainsi que du fait de la présence de reliefs favorisant le ruissellement (voir section « Les facteurs physiques affectant le cycle de l'eau »). À l'opposé, une proportion bien plus importante (captant de 70 à plus de 90 % des précipitations) est observée dans des zones cumulant à la fois de faibles quantités de précipitations et de fortes possibilités d'évapotranspiration (climat chaud, présence de végétation...) : zones de plaines (vallée de la Loire, plaine d'Alsace, vallée de l'Allier, Midi toulousain...) et/ou du bassin méditerranéen.

**Figure 1.7.** Proportions annuelles moyennes (2010-2020) de précipitations suivant trois chemins possibles : évapotranspiration, infiltration (recharge des nappes), ruissellement.



Avec des données fournies à une résolution de  $8 \times 8$  km (grille Safran), cette figure représente le ratio entre le cumul annuel de chacun des trois flux et le cumul annuel de précipitations. Ces proportions simplifient cependant en partie la complexité spatiale et temporelle du cycle de l'eau. Source des données : Météo-France, 2023<sup>21</sup> / Infographie : © Alexandre Coche, 2024.

Ces proportions sont également à interpréter au regard du cumul annuel de précipitations rapporté précédemment. En effet, en proportion de précipitations, certaines zones pourraient sembler présenter une faible évapotranspiration, alors qu'il s'agit en réalité de la conséquence de la présence de forts cumuls de précipitations. À titre d'exemple, dans les zones de plaines du département des Pyrénées-Atlantiques, de 45 à 50 % des précipitations annuelles retournent dans l'atmosphère par évapotranspiration. Cela pourrait ainsi amener à penser que l'évapotranspiration est faible sur ce territoire

21. <https://meteo.data.gouv.fr> (consulté le 18/08/2025).

(comparée aux 75-80 % observés dans la région de Perpignan), alors qu'il s'agit, en réalité, d'une des zones de France présentant les plus forts cumuls d'évapotranspiration : 650 mm d'évapotranspiration (50 % de 1 300 mm de précipitations) comparés aux 450 mm d'évapotranspiration (75 % de 600 mm de précipitations) de la région de Perpignan. Certaines fortes proportions d'évapotranspiration (sur le pourtour méditerranéen notamment) s'expliquent également du fait que ce flux est aussi alimenté par de l'eau provenant de l'amont des bassins versants — générant donc une évapotranspiration plus importante que ne permettraient les précipitations locales seules.

L'infiltration rechargeant les nappes souterraines est, quant à elle, inversement proportionnelle aux tendances observées pour l'évapotranspiration : les zones où les précipitations s'infilrent le plus sont situées là où les proportions d'évapotranspiration sont les plus faibles. Ainsi, alors qu'environ 20 à 30 % des précipitations s'infilrent et rechargent les nappes souterraines sur une majorité de territoires, cette proportion peut dépasser les 40 % sur les massifs montagneux (les précipitations étant moins captées par la végétation) et être inférieure à 10 % sur les zones de plaines ou du bassin méditerranéen (les précipitations étant quasi intégralement captées par la végétation). Pour finir, le ruissellement présente une bien plus faible disparité — 5 à 10 % des précipitations annuelles suivent ce chemin sur la quasi-totalité des territoires. Des proportions plus importantes de ruissellement sont néanmoins retrouvées dans certaines zones montagneuses — conséquence de la présence de reliefs et de faibles couvertures végétales favorisant l'écoulement de l'eau en surface.

## **La variabilité saisonnière des différents flux d'eau**

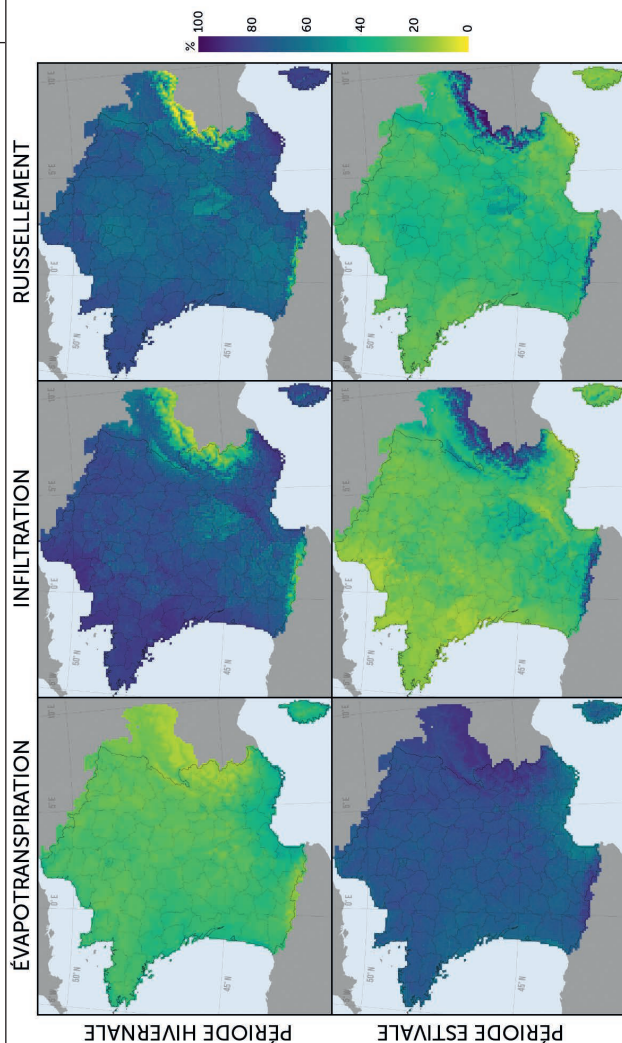
En hydrologie, les années ne suivent pas exactement les dates du calendrier ordinaire : l'année hydrologique constitue une période de douze mois qui débute après le mois habituel des plus basses eaux (également appelée période d'étiage<sup>22</sup>, tandis que le débit minimum d'un cours d'eau sur une année est nommé débit d'étiage<sup>23</sup>). En France métropolitaine, la majorité des cours d'eau sont alimentés principalement par les grands systèmes pluvieux d'hiver, et présentent donc leur période de hautes eaux en hiver et de basses eaux en été : il s'agit d'un régime hydrologique dit « pluvial »<sup>24</sup> (pouvant être plus ou moins contrasté suivant les écarts de débits entre hiver et été). Pour dire les choses simplement, pour une majorité de territoires, les années hydrologiques commencent ainsi généralement le 1<sup>er</sup> octobre d'une année et se terminent le 30 septembre de l'année calendaire suivante. L'année hydrologique (d'octobre à septembre) peut ensuite être divisée en suivant deux saisons principales : la période hivernale (d'octobre à mars) et la période estivale (d'avril à septembre).

22. <https://glossaire.eauetbiodiversite.fr/concept/periode-detiage> (consulté le 18/08/2025)

23. <https://glossaire.eauetbiodiversite.fr/concept/debit-detiage> (consulté le 18/08/2025).

24. <https://hydro.eaufrance.fr/aide/definitions-hydrologiques> (consulté le 18/08/2025).

**Figure 1.8.** Répartition moyenne (2010-2020) de l'évapotranspiration, de l'infiltration (recharge des nappes) et du ruissellement entre la période hivernale (octobre-mars) et la période estivale (avril-septembre).

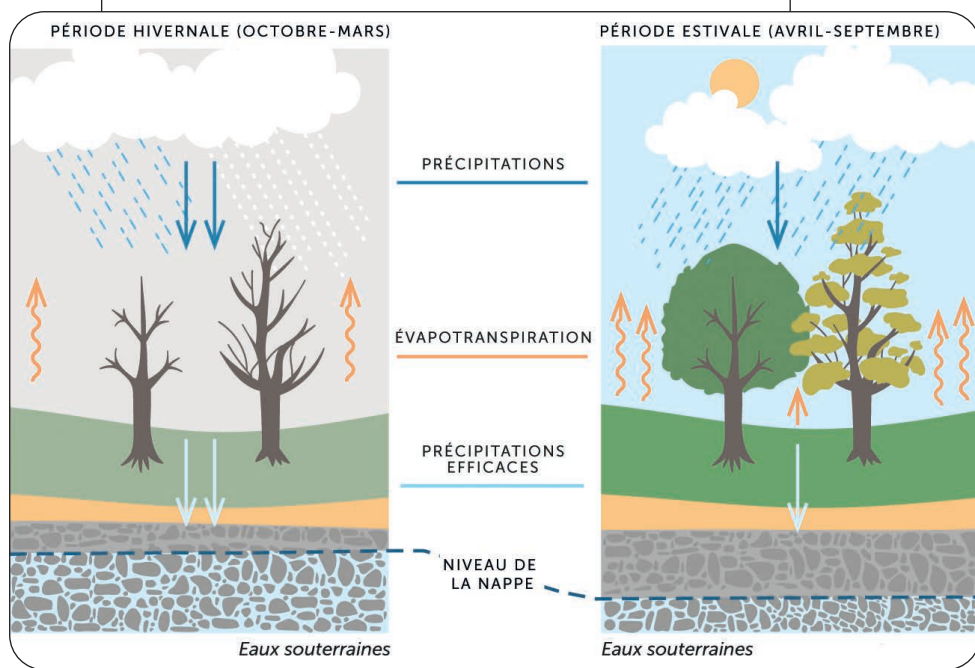


Chaque carte représente la proportion moyenne observée chaque saison (en divisant le cumul saisonnier par le cumul annuel). Cette figure ne vise pas à comparer deux flux entre eux, mais à observer la répartition entre les saisons au sein d'un même flux : si la valeur indique 70 % (de précipitations, d'évapotranspiration...) sur la période hivernale, cela signifie que les 30 % restants surviennent sur la période estivale. Source des données : Météo-France, 2023<sup>25</sup> / Infographie : © Alexandre Coche, 2024.

25. <https://meteo.data.gouv.fr> (consulté le 18/08/2025).

Les précipitations, tout d'abord, sont généralement plus importantes durant la période hivernale sur une majorité de territoires. Ensuite, la part de précipitations efficaces varie également selon les saisons (fig. 1.9). Ainsi, l'évapotranspiration est maximale entre le milieu du printemps et le début de l'automne (période estivale), car la combinaison entre chaleur et eau disponible permet à l'activité biologique (la végétation en particulier) de se développer (fig. 1.8). *A contrario*, l'infiltration et le ruissellement sont donc plus faibles durant la période estivale, alors qu'ils sont maximaux durant la période hivernale (lorsque l'évapotranspiration est faible). Du fait de ce phénomène, en France métropolitaine, les précipitations pendant la période hivernale sont donc capitales pour permettre la recharge des nappes souterraines, là où les précipitations printanières et estivales n'ont pas la même efficacité. Les hivers secs par conséquent souvent très impactants et conduisent les nappes souterraines à des niveaux bas du fait d'un défaut de recharge.

**Figure 1.9.** Différence de précipitations efficaces entre la période hivernale (octobre-mars) et la période estivale (avril-septembre).



Source : © Water Family, adapté de l'OFB / Matthieu Nivesse (d'après OIEau)<sup>26</sup>.

26. <https://www.eaufrance.fr/les-precipitations-efficaces> (consulté le 18/08/2025).

Enfin, les zones montagneuses présentent des proportions de ruissellement et d'infiltration globalement inversées de celles du reste du territoire national : la majorité de ces flux se produit durant la période estivale. Ce phénomène s'explique en grande partie du fait que, sur ces zones montagneuses, les précipitations hivernales interviennent principalement sous forme de neige qui ne viendra fondre qu'à partir du printemps.

## Le cas particulier du manteau neigeux et des glaciers

Dans certains territoires et à certaines périodes de l'année, une partie des précipitations se fait sous forme de neige, permettant ainsi de constituer un manteau neigeux (c'est-à-dire un stockage transitoire pour l'eau issue des précipitations) et donc de décaler dans le temps les différents flux : infiltration, ruissellement ou évapotranspiration. Bien entendu, suivant les conditions climatiques locales, ce stockage transitoire pourra être très variable dans la durée : quelques minutes ou heures (si la neige fond presque immédiatement), plusieurs semaines ou mois (si la neige fond au printemps et en été), et jusqu'à plusieurs années/décennies/siècles (si la neige s'accumule pour former des glaciers). À noter qu'une partie de l'eau stockée sous forme de neige ou de glace peut également repasser directement à l'état gazeux et retourner dans l'atmosphère, sans passer par l'état liquide : un processus appelé « sublimation ». Cependant, pour des raisons de simplification, ce processus relativement marginal ne sera pas abordé plus en détail, afin de se concentrer uniquement sur les trois flux mentionnés précédemment.

Ainsi, ce décalage dans le temps des différents chemins de l'eau issue des précipitations (le ruissellement et l'infiltration, en particulier) a des conséquences marquées sur l'hydrologie des bassins versants — affectant significativement les débits des cours d'eau et les niveaux de nappes. En particulier, la constitution d'un manteau neigeux en hiver joue un rôle central dans l'hydrologie de nombreux bassins versants de montagne, décalant dans le temps le ruissellement et l'infiltration : ce processus permet ainsi de stocker une partie des précipitations lorsqu'elles sont abondantes (en hiver) pour les restituer lentement à partir du printemps. Dans ces zones, le printemps (voire l'été) constitue la période de hautes eaux des cours d'eau, tandis que la période hivernale correspond à une période de très faible débit : il s'agit d'un régime hydrologique dit « nival »<sup>27</sup>. Dans certaines zones de piémonts des massifs montagneux, des régimes hydrologiques mixtes « pluvio-nival » ou « nivo-pluvial » peuvent également exister — présentant une alternance de deux périodes de hautes eaux et de deux périodes de basses eaux plus ou moins marquées dans une année.

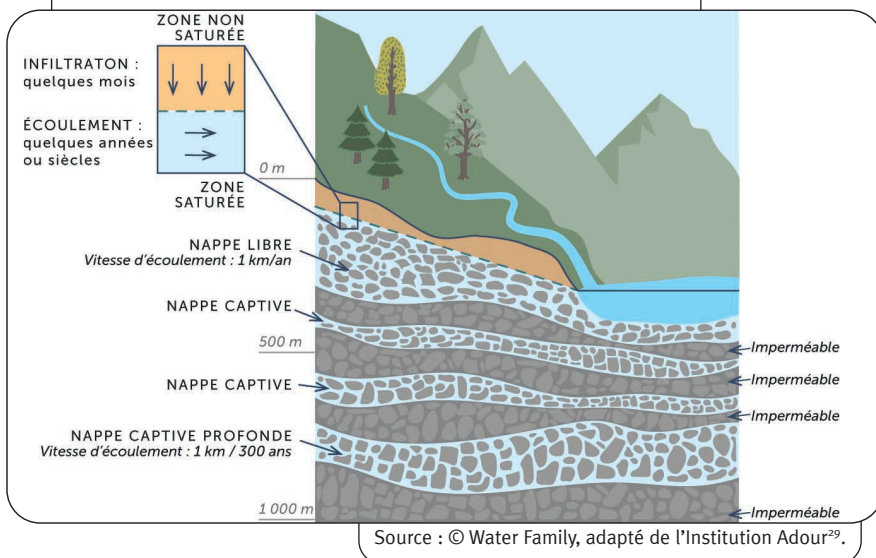
27. <https://hydro.eaufrance.fr/aide/definitions-hydrologiques> (consulté le 18/08/2025).



## Les eaux souterraines

De manière générale, les représentations courantes du cycle de l'eau tendent à invisibiliser un élément pourtant crucial : les eaux souterraines. Du fait de leur caractère souterrain (par nature invisible), elles sont le plus souvent soit totalement absentes, soit incorrectement représentées — en véhiculant l'image d'eau stockée dans des cavernes souterraines (ce qui n'est pas le cas de la majorité des nappes). En effet, contrairement à une idée souvent reçue, les nappes d'eau souterraine ne sont généralement ni des lacs ni des rivières souterraines. Il s'agit en fait simplement de l'eau (provenant de l'infiltration des précipitations) contenue dans les pores ou les fissures des sédiments ou des roches. Lorsque l'eau qui s'infiltré dans le sol rencontre une couche imperméable (appelée « substratum »), elle ne peut plus descendre. Elle va alors s'accumuler au sein de réservoirs rocheux souterrains (nommés aquifères) et former une nappe. Ainsi, l'eau est généralement présente absolument partout sous la surface du sol. Néanmoins, du fait de la diversité des contextes géologiques (voir section « Le sous-sol »), combinée à celle des climats et du relief, une grande variété de nappes d'eau souterraines existe sur Terre (en taille, profondeur, comportement)<sup>28</sup>. De manière extrêmement simplifiée, nous les regroupons ici en deux principales catégories : les nappes libres et les nappes captives (fig. 1.10).

**Figure 1.10.** Représentation schématique d'un bassin versant et de sa composante souterraine.



28. <https://www.brgm.fr/fr/tag/siges-systemes-information-gestion-eaux-souterraines> (consulté le 18/08/2025).

29. <https://www.institution-adour.fr/nappes-profondes/nappes-profondes.html> (consulté le 18/08/2025).

Tout d'abord, les nappes peuvent être dites « libres », si la surface supérieure de l'eau n'est pas recouverte d'un « couvercle » imperméable, ce qui lui permet de fluctuer sans contrainte. Communiquant avec la surface, ces nappes sont généralement peu profondes et se renouvellent rapidement en fonction des précipitations. Après s'être infiltrée et avoir atteint ce type de nappe, l'eau s'écoule horizontalement de quelques mètres par jour en suivant la couche imperméable sous-jacente, en direction du point le plus bas (souvent situé au niveau du lit des cours d'eau ou de l'exutoire du bassin versant). Tant qu'il pleut, la nappe se remplit plus vite qu'elle ne se vide et son niveau monte, tandis que, lorsqu'il ne pleut plus, son niveau baisse (vidange de la nappe). Les nappes phréatiques (dont le terme, très couramment utilisé, désigne en fait la nappe d'eau souterraine la plus proche de la surface du sol) appartiennent ainsi généralement à cette catégorie.

Il arrive également que les eaux souterraines s'écoulent sous une couche géologique imperméable (une couche argileuse, par exemple), pour ensuite former une nappe dite « captive ». L'eau va alors s'écouler beaucoup plus lentement horizontalement et le niveau de la nappe ne pourra plus monter (étant bloqué vers le haut par la couche imperméable). Dans cette nappe captive, l'eau va donc se trouver sous pression : du fait d'une pression supérieure à la pression atmosphérique, en cas de forage à travers la couche imperméable, l'eau va monter dans le tube, voire jaillir spontanément à la surface (on parle alors de forage « artésien »). Néanmoins, cet aspect « captif » ne concerne généralement qu'une partie de la nappe, la partie située sous une couche imperméable, tandis que la partie située au niveau de la zone de recharge est, quant à elle, « libre ». Ce phénomène peut notamment se produire dans le cas de zones composées de multiples couches géologiques et de phénomènes de plissement (voir section « Le sous-sol »). Dans la nature, suivant la composition du sous-sol, il y a ainsi souvent une succession de couches poreuses et imperméables, formant une sorte de « mille-feuille » où sont superposées une succession de nappes captives. Ces nappes sont donc souvent profondes (jusqu'à plusieurs centaines de mètres).

## Circulation des eaux souterraines et échanges avec la surface

Une importante lacune parmi les schémas « classiques » de cycle de l'eau est qu'ils n'incluent quasiment jamais une représentation des interactions entre les eaux souterraines et la surface. Si les flux verticaux — correspondant à l'infiltration de l'eau qui alimente la recharge des eaux souterraines — sont généralement inclus, les écoulements horizontaux à travers le milieu souterrain (en suivant la couche imperméable dans le sens de la pente) et les échanges avec la surface sont très peu représentés. Bien que les écoulements dans le milieu souterrain soient très variables suivant la nature des formations rocheuses et la topographie, ce processus est d'une importance capitale pour le cycle hydrologique. En effet, le milieu souterrain offre une étape transitoire au sein du cycle de l'eau, permettant un déphasage des précipitations en comparaison avec l'eau



ruisselant directement en surface : il permet de stocker une partie de l'eau lorsqu'elle est disponible en abondance (en période hivernale notamment), pour ensuite alimenter les eaux de surface (sources, cours d'eau, lacs, zones humides) lors de périodes plus sèches (Andermann *et al.*, 2012). En d'autres termes, c'est ce processus qui permet à une majorité de rivières de conserver un certain débit, même lorsqu'il ne pleut pas pendant une longue période. Bien entendu, la proportion est très variable en fonction des territoires, mais dans certains cas, les eaux souterraines peuvent contribuer à plus de 80 % au débit annuel moyen des cours d'eau (Mougin *et al.*, 2008).

De manière schématique, il faut imaginer que les eaux souterraines affleurent en surface à chaque fois que le niveau des nappes croise le niveau topographique (fig. 1.11, en haut). C'est notamment au niveau de ces affleurements de nappes que se retrouve une bonne partie des cours d'eau, plans d'eau, sources et zones humides. Ainsi, lorsque le niveau des nappes est suffisamment haut pour intercepter le relief, il permet généralement la résurgence d'une importante quantité d'eau en surface. Au contraire, lorsque le niveau des nappes est plus bas, les résurgences vers la surface sont beaucoup plus faibles (fig. 1.11, en bas) — voire cela s'inverse, dans le cas où la nappe n'intercepte plus du tout la topographie, et c'est l'eau en surface (s'il y a des précipitations ruisselant ensuite dans un cours d'eau) qui s'infiltre pour recharger la nappe située plus en profondeur.

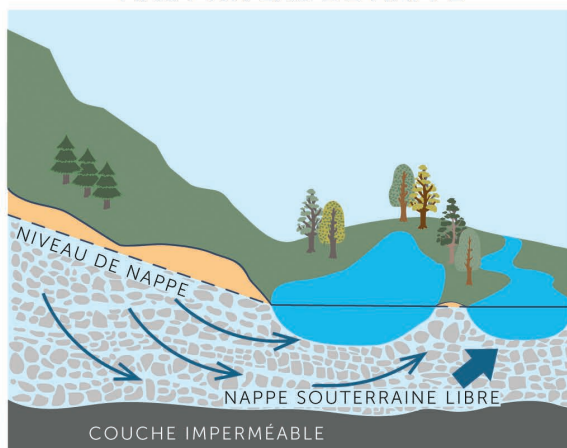
Cependant, cette proximité entre la nappe et la surface n'est pas constante sur tous les territoires et la nature de ces échanges dépend notamment de plusieurs facteurs. Tout d'abord, la quantité d'eau pouvant recharger les aquifères (précipitations pouvant s'infiltre) déterminera la possibilité pour la nappe d'être suffisamment haute pour atteindre la surface du sol : cette différence sera notamment marquée entre un territoire au climat humide et un territoire au climat plus aride. Ensuite, pour une même quantité d'eau rechargeant le milieu souterrain, le niveau des nappes ne sera pas toujours aussi haut, selon les capacités de stockage (perméabilité) et les temps de transfert de l'eau dans les aquifères. En d'autres termes, une même quantité d'eau peut permettre de recharger une nappe de manière plus importante dans le cas d'un aquifère de faible capacité (peu perméable) que dans le cas d'un aquifère de grande capacité (très perméable) — plus d'eau étant alors nécessaire pour atteindre un haut niveau de nappe. Enfin, il est nécessaire d'intégrer également la variabilité topographique à l'équation, dans la mesure où, en l'absence de relief marqué (par exemple dans le cas de plateaux), la nappe souterraine (quel que soit son niveau) pourra plus rarement intercepter la topographie que dans le cas d'un territoire très vallonné.

Ainsi, de manière simplifiée, lorsque les niveaux de nappe sont suffisamment hauts (par exemple en climat humide, ou dans des systèmes peu perméables où l'eau est principalement stockée à proximité de la surface), la majorité des circulations d'eau souterraine se produit à une échelle locale (fig. 1.12, gauche), permettant l'alimentation des eaux de surface et la présence d'un réseau hydrographique dense, c'est-à-dire contenant de nombreux cours d'eau. En revanche, dans le cas de systèmes disposant de niveaux de nappes plus bas (par exemple en zones plus arides, ou dans des systèmes très perméables

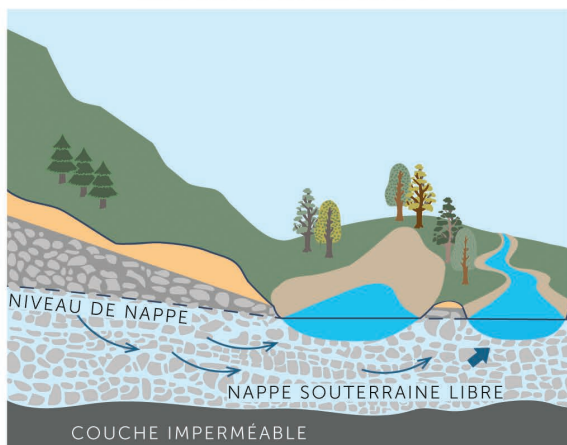
où l'eau est stockée plus en profondeur, comme certains milieux poreux, milieux karstiques...), la majorité des circulations d'eau souterraine se produit à des échelles plus régionales, l'eau s'écoulant plus en profondeur et rejoignant l'exutoire en alimentant moins les eaux de surface (fig. 1.12, droite). Cet aspect sera développé plus en détail dans la section « Les liens entre caractéristiques du sous-sol et hydrologie en surface ».

**Figure 1.11.** Représentation schématique des échanges entre nappe et surface suivant différentes hauteurs de nappe.

### HAUT NIVEAU DE NAPPE

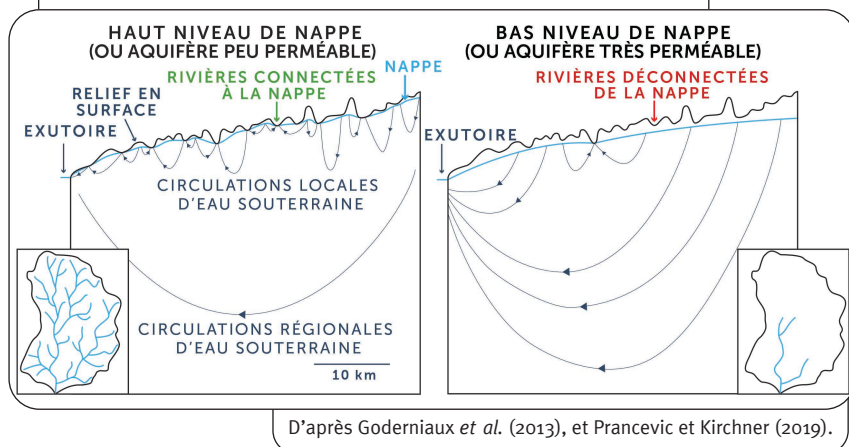


### BAS NIVEAU DE NAPPE



Source : © Water Family.

**Figure 1.12.** Représentation simplifiée de la circulation des eaux souterraines et de leur relation avec la surface suivant le relief (affectant ensuite le réseau hydrographique), en fonction de la hauteur de nappe (ou de la perméabilité de l'aquifère).

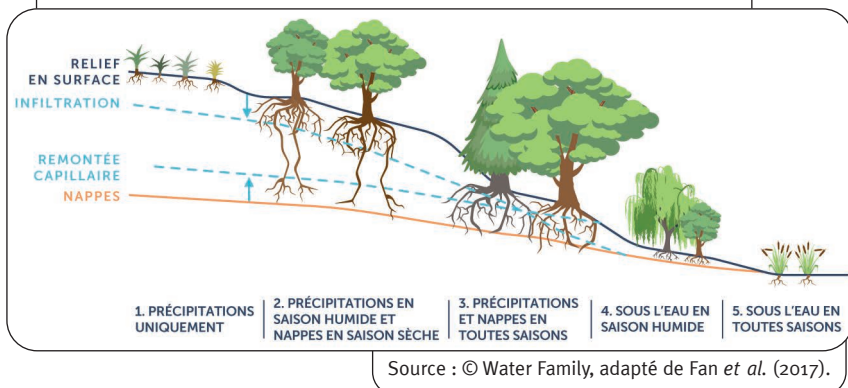


D'après Goderniaux *et al.* (2013), et Prancevic et Kirchner (2019).

Une déconnexion saisonnière entre les eaux souterraines et les cours d'eau peut également se produire naturellement en raison des variations annuelles des précipitations : les cours d'eau sont alors qualifiés « d'intermittents » (Datry *et al.*, 2014 ; Leigh *et al.*, 2016). Présentes sous toutes les latitudes à l'échelle mondiale (Messenger *et al.*, 2021), en France, ces rivières intermittentes sont principalement observées dans les territoires au climat sec (zone méditerranéenne notamment) et au niveau des têtes de bassin versant. Bien sûr, dans certains contextes, les cours d'eau peuvent ne dépendre que du ruissellement issu des précipitations, et ils seront alors fortement intermittents. En revanche, la présence d'un cours d'eau pérenne requiert généralement une alimentation de la part des nappes ou alors, dans certains cas, de la part d'autres stockages : manteau neigeux, glaciers, plans d'eau...

Un autre aspect important relatif aux échanges entre les nappes et la surface concerne les relations entre les eaux souterraines et la végétation (à travers l'humidité du sol). La disponibilité de l'eau pour les plantes dépend principalement de la quantité d'eau stockée dans les sols et des types de systèmes racinaires permettant d'accéder à cette eau en profondeur. Si le système racinaire est relativement variable en fonction des espèces végétales et des individus, l'humidité du sol, quant à elle, est dépendante non seulement de l'infiltration de l'eau issue des précipitations, mais également de remontées d'eau par capillarité depuis les eaux souterraines (fig. 1.13). Ainsi, en soutenant la végétation par en dessous, les eaux souterraines peuvent fournir une source d'eau découplée des variations météorologiques et compenser l'absence de précipitations durant des périodes de sécheresse.

**Figure 1.13.** Représentation simplifiée d'un profil de sol, le long d'un gradient topographique (humidifié depuis le haut par infiltration des précipitations et depuis le bas par remontées capillaires à partir des nappes), et type de végétation associé.

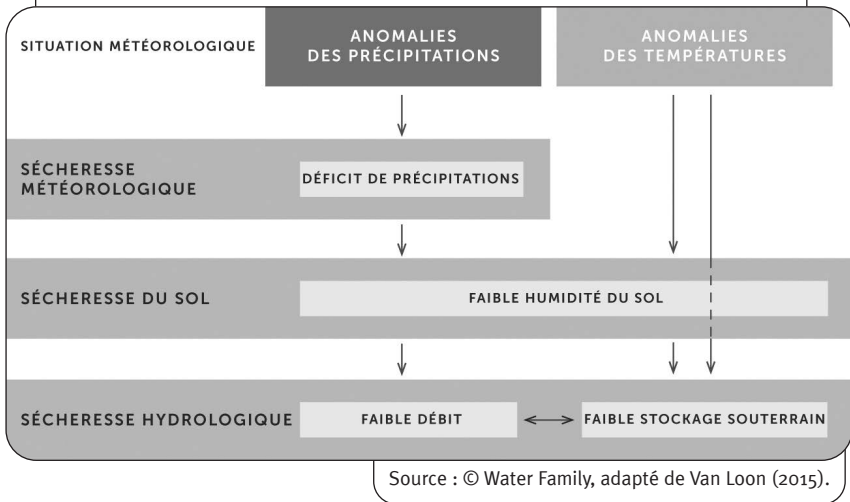


## Les différents types de sécheresse

La sécheresse correspond à un déficit anormal, sur une période prolongée, d'au moins une des composantes du cycle hydrologique terrestre<sup>30</sup>. D'après la littérature scientifique (Wilhite et Glantz, 1985), différents types de sécheresse peuvent être distingués (fig. 1.14). Tout d'abord, la sécheresse météorologique correspond à un déficit prolongé de précipitations. Ensuite, la sécheresse du sol (également nommée « sécheresse agricole ») correspond à un déficit d'humidité du sol, entraînant un manque d'eau disponible pour les plantes et impactant donc directement les écosystèmes naturels et la production agricole (végétaux et, indirectement, animaux). Enfin, la sécheresse hydrologique correspond à un déficit des eaux de surface (débit dans les cours d'eau, niveau des plans d'eau) et des eaux souterraines (niveau des nappes).

Bien que tous les types de sécheresse tirent généralement leur origine d'un déficit de précipitation, la sécheresse tend à se propager de façon décalée entre les différentes composantes du cycle hydrologique. En effet, un déficit de précipitations prendra le plus souvent plusieurs semaines pour se traduire en une diminution significative de l'humidité du sol, et il faudra ensuite plusieurs semaines à plusieurs mois pour que ce déficit s'observe dans les eaux de surface et les nappes souterraines. De la même manière, une période aussi longue de précipitations sera nécessaire pour que les

30. <https://www.inrae.fr/actualites/quest-ce-que-secheresse> (consulté le 18/08/2025).

**Figure 1.14.** Différentes catégories de sécheresse et leur « propagation ».

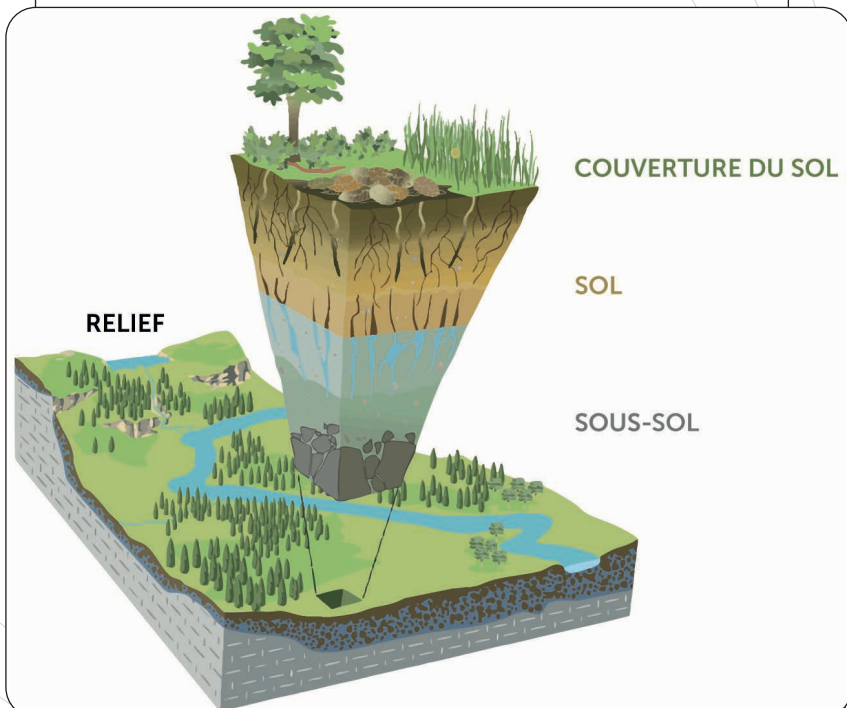
stocks souterrains se régénèrent et que les niveaux de nappes et débits des rivières remontent. C'est pour cette raison qu'en fin d'année 2023, malgré plusieurs mois de précipitations importantes, les nappes de nombreux territoires demeuraient sous leur niveau normal, traduisant la longue temporalité nécessaire pour récupérer du déficit accumulé avec la sécheresse de 2022. Ce déphasage entre les différents types de sécheresse s'explique en partie du fait des échanges entre le milieu souterrain et la surface décrits précédemment — les temps de réponse variant d'un territoire à l'autre, en fonction du contexte géologique et hydrogéologique local. Enfin, même à des niveaux de précipitation constants (absence de sécheresse météorologique), l'augmentation des températures peut directement générer une sécheresse du sol et une sécheresse hydrologique du fait d'une augmentation de l'évapotranspiration.

## 2. Les facteurs affectant le cycle de l'eau

### Les facteurs physiques

La catégorie des facteurs physiques regroupe un ensemble de facteurs affectant directement ou indirectement (à travers leur effet sur d'autres facteurs) le cycle de l'eau : le relief, la couverture du sol, le sol et le sous-sol (géologie) (fig. 2.1).

**Figure 2.1.** Illustration des facteurs physiques affectant le cycle de l'eau à travers une représentation de ce qui est appelé « la zone critique ».

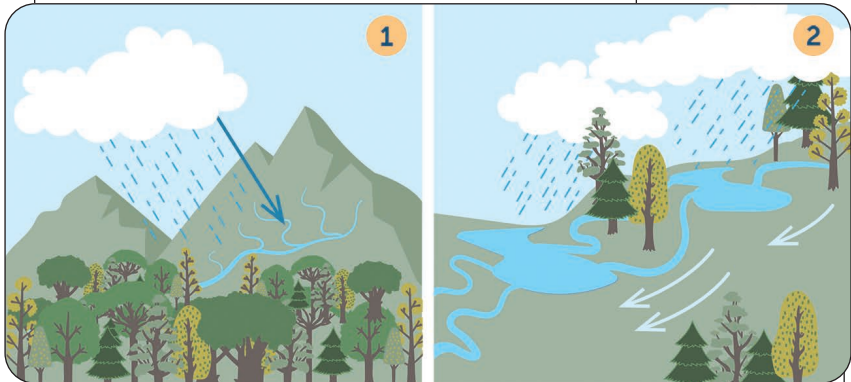


Source : Chorover *et al.* (2007).

## ■ Le relief

Le relief est un élément extrêmement variable dans les paysages, suivant un gradient allant de plaines quasiment plates jusqu'à de hautes montagnes. Cette variabilité se traduit ensuite par une multitude d'effets sur les stocks et flux d'eau (fig. 2.2).

**Figure 2.2.** Exemple de deux catégories d'effets du relief sur les processus hydrologiques : (1) effet orographique ; (2) effet sur les apports d'eau au niveau des lacs.



Source : © Water Family, adapté de Turner et Gardner (2015).

Tout d'abord, le relief est l'élément à la base des bassins versants (topographiques), définissant la direction des écoulements et donc la structure des réseaux hydrographiques (voir section « Le bassin versant »). La topographie peut également influencer directement les précipitations par effet « orographique » (fig. 2.2-1). En effet, suivant le sens du vent, l'atmosphère rencontrant du relief (obstacle) sur son passage sera contrainte de monter en altitude, provoquant la détente de l'air. À mesure qu'il prendra de l'altitude, l'air chargé d'humidité se refroidira jusqu'à atteindre le point de saturation de la vapeur d'eau, générant des précipitations. Ce processus est bien visible en observant la distribution des précipitations à l'échelle nationale (voir fig. 1.5), celles-ci étant les plus abondantes au niveau des différents massifs montagneux (Alpes, Pyrénées, Massif central, Vosges, Jura, Morvan, monts d'Arrée...). Souvent, ces précipitations ont lieu principalement sur le versant orienté dans la direction du vent, tandis que le versant opposé peut rester totalement sec, générant ainsi des différences climatiques très marquées entre chaque versant.

L'aspect du relief (altitude, pente, orientation) est également un facteur déterminant les températures (air, sol), ainsi que la quantité d'humidité et de nutriments disponibles localement, ce qui influence directement le type de végétation (couverture

du sol) pouvant s'établir et donc ses conséquences indirectes sur le cycle de l'eau (voir section suivante, « La couverture du sol »). Le relief peut aussi affecter la couverture du sol à travers son effet sur l'intensité et la fréquence des perturbations naturelles (crues, vents violents, glissements de terrain...). Enfin, il affecte les flux d'énergie et de matière à l'échelle du paysage, comme les vitesses d'écoulement de l'eau sur le bassin versant (sous l'effet de la pente, voir plus haut, la section « Évapotranspiration, infiltration et ruissellement : trois chemins possibles pour l'eau des précipitations »), ou encore les apports d'eau au niveau des lacs (voir fig. 2.2-2). Les lacs situés sur des terrains en altitude (mieux drainés) reçoivent en effet une plus importante proportion d'eau issue du ruissellement direct des précipitations que les lacs situés plus bas, où les apports issus des eaux souterraines prédominent.

## ■ La couverture du sol

La couverture du sol, qu'elle soit d'origine naturelle (forêts, prairies, dunes, falaises...) ou anthropique (zones urbaines, zones agricoles...), affecte significativement les processus hydrologiques. La présence ou non de végétation, ainsi que le type de celle-ci (en particulier les forêts), contrôlent notamment directement les échanges d'eau entre le sol et l'atmosphère (Ellison *et al.*, 2017), affectant les flux hydrologiques tels que l'évapotranspiration, le ruissellement et l'infiltration (recharge des eaux souterraines) (Warburton *et al.*, 2012). La végétation joue de la sorte un rôle important — et souvent négligé — dans la régulation du climat. En particulier, au niveau mondial, jusqu'à la moitié des précipitations tombant sur les continents provient de l'évapotranspiration continentale elle-même (Schneider *et al.*, 2017 ; Tuinenburg *et al.*, 2020). Or, il est estimé que 60 à 80 % de cette humidité atmosphérique d'origine terrestre provient de la seule transpiration des plantes (Schlesinger et Jasechko, 2014) (les 20 à 40 % restants provenant de l'évaporation en surface et dans le sol), ce qui illustre le rôle important joué par la végétation dans l'alimentation du cycle des précipitations (Jasechko *et al.*, 2013).

Par exemple, il est généralement reconnu que les forêts agissent comme des « pompes » du fait des forts besoins en eau des arbres, qui aspirent l'eau du sol par leurs racines et la libèrent sous forme de vapeur d'eau dans l'atmosphère à travers les pores de leur feuillage. Cela se traduit par une importante évapotranspiration, ce qui entraîne une augmentation de la couverture nuageuse et des précipitations à plus large échelle. Il a également été théorisé que la forêt pourrait jouer un rôle central sur le climat, en étant capable d'influer sur les déplacements de l'humidité présente dans l'air, à l'aide d'un processus appelé « pompe biotique » (Makarieva et Gorshkov, 2007), et créant de gigantesques flux de vapeur d'eau, surnommés « rivières volantes », à l'échelle continentale (Newell *et al.*, 1992), ce qui va former des nuages et créer des précipitations à des centaines, voire des milliers, de kilomètres de distance. Ainsi, alors qu'en zone littorale la majorité des précipitations proviennent de l'humidité générée par l'évaporation des océans, sur les continents, cette origine est progressivement remplacée par de l'humidité atmosphérique d'origine terrestre.



Enfin, les forêts agissent également comme des « éponges » (importantes capacités d'infiltration), du fait de la présence abondante de systèmes racinaires et de matière organique (Bruijnzeel, 2004). Ainsi, les bassins versants forestiers présentent généralement des débits moyens (annuels) de cours d'eau plus faibles que ceux observés sur d'autres types de bassins versants (Rouquet, 2012) — illustrant ici notamment l'impact de ce type de milieu sur l'atténuation des inondations. Dans les zones présentant un relief marqué (en particulier en montagne), la présence de forêt, à travers cette réduction du ruissellement au profit de l'infiltration, permet en outre de fortement limiter l'érosion des sols (Elliot *et al.*, 1999).

## ■ Le sol

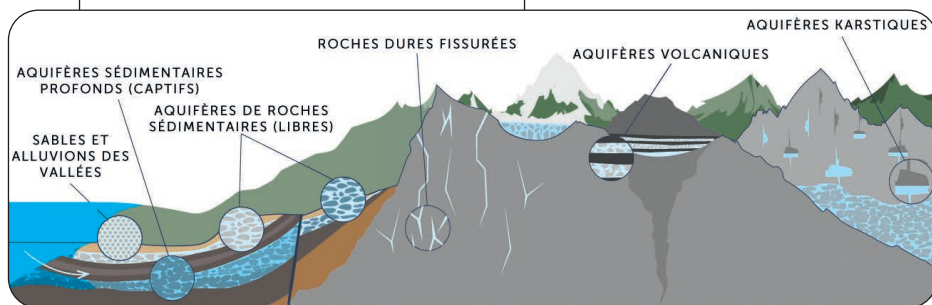
Couche externe de la croûte terrestre composée de matière minérale et organique, le sol est à la fois le support et le produit du vivant. Selon leurs compositions minérales, leur biodiversité (notamment en microorganismes), leurs teneurs en matière organique et leur structure, les sols ont une très grande influence à la fois sur l'infiltration, le ruissellement et l'évapotranspiration (Keesstra *et al.*, 2021). En effet, la présence d'une abondante activité microbienne, ainsi que d'une forte teneur en matière organique, augmente significativement les capacités d'infiltration et de stockage de l'eau au sein des porosités du sol (Franzluebbers, 2002). De meilleures capacités de rétention d'eau permettent ainsi d'augmenter le stock « humidité du sol » qui sera ensuite disponible pour la croissance (et la transpiration) de la végétation (d'où son nom « d'eau verte ») (Velpuri et Senay, 2017). De bonnes capacités d'infiltration signifient également qu'une part importante des précipitations atteignant la surface du sol peut s'infiltrer en profondeur pour ensuite recharger les nappes souterraines, tandis qu'au contraire, si les capacités d'infiltration sont faibles, le ruissellement augmente (Angulo-Jaramillo *et al.*, 2016). De plus, un sol avec une biodiversité importante et une bonne structure peut aussi présenter une surface plus « rugueuse », ce qui permet une accumulation plus longue en surface, laissant ainsi plus de temps à l'eau de pluie pour s'infiltrer (Le Bissonnais *et al.*, 2005). Enfin, selon leurs capacités de rétention d'eau et leurs concentrations en nutriments et minéraux, les sols affectent directement l'assemblage des espèces végétales pouvant se développer, ce qui impacte ensuite l'évapotranspiration. Notamment, des sols en « bonne santé » possèdent généralement une forte concentration en matière organique (variable en fonction du type de sol et des conditions climatiques et géologiques locales), elle-même capable de soutenir une biodiversité importante (Bot et Benites, 2005).

## ■ Le sous-sol

Vis-à-vis de la ressource en eau, les capacités d'emménagement (stockage) et d'écoulement dans le sous-sol sont fortement conditionnées par la nature géologique et la géométrie des formations rocheuses constituant les aquifères (ou réservoirs rocheux). Il existe notamment plusieurs grandes familles de formations géologiques : les formations

sédimentaires meubles (alluvions, moraines...) et consolidées (calcaires, dolomies, grès, craie...) ; les formations métamorphiques (gneiss, marbres, schistes...) ; et les formations magmatiques ou plutoniques et volcaniques (granite, basalte...) (Dörfliger, 2015). Deux propriétés des roches sont ensuite particulièrement importantes vis-à-vis des caractéristiques hydrogéologiques : la porosité (pourcentage de vide dans la roche au sein duquel l'eau peut être stockée) et la perméabilité (capacité des roches à laisser circuler l'eau). Cette nature géologique du sous-sol permet ainsi de différencier trois grands types d'aquifères : les aquifères de milieux poreux, les aquifères de milieux fissurés et les aquifères de milieux karstiques (fig. 2.3).

**Figure 2.3.** Les grands types d'aquifères.



Source : © Water Family, adapté de Castello et Bouchi-Lamontagne (2009).

### Les grands types d'aquifères

Tout d'abord, les aquifères de milieux poreux constituent une catégorie dans laquelle l'eau s'accumule et s'écoule au sein des pores des roches. De manière simplifiée, il est possible d'illustrer ce type d'aquifère en prenant l'image d'un aquarium rempli de sable et dans lequel on verserait ensuite de l'eau : l'eau remplirait alors tous les espaces entre les grains de sable. Composés de roches sédimentaires meubles (sables, graviers...) ou dures (grès, calcaire, craie), les aquifères de milieux poreux sont principalement trouvés dans les bassins sédimentaires (comme les Bassins parisien et aquitain) et les vallées des rivières. Ils peuvent plus rarement être composés de scories volcaniques, qui agissent dans ce cas de manière similaire à des roches sédimentaires meubles (sables, graviers...). Poreuses et perméables, ces formations rocheuses peuvent parfois être très épaisses et étendues, abritant d'importants volumes d'eau souterraine. Elles peuvent également se superposer les unes aux autres, formant ainsi des dépôts en couches, à l'image d'un millefeuille, qui peuvent de plus avoir été déformés et morcelés par la formation de chaînes de montagnes (Alpes, Pyrénées). Cette catégorie regroupe aussi l'ensemble des aquifères constitués de matériaux déposés par les cours d'eau dans leurs vallées (aquifères alluviaux) : sables et graviers intercalés dans des limons fins.

Les aquifères de milieux fissurés sont pour leur part principalement constitués de roches cristallines (granites, schistes, gneiss...) et de laves volcaniques généralement peu poreuses et peu perméables (Huscroft *et al.*, 2018). En revanche, ces roches peuvent être plus ou moins altérées (du fait d'une modification de leurs propriétés physicochimiques) sur les premiers mètres de profondeur, ou fracturées, permettant un peu les écoulements et le stockage des eaux souterraines (Rempe et Dietrich, 2014). L'eau est ainsi contenue et circule dans les failles et les fissures de la roche, de même que dans les altérites (sorte de sable issu de l'altération des roches). Ce type d'aquifères présente généralement de faibles capacités de stockage d'eau sur de longues périodes, en comparaison de grands systèmes sédimentaires poreux (tels que les nappes profondes de Gironde ou du Bassin parisien), où de grandes quantités d'eau peuvent être stockées. Ces formations rocheuses abritent donc des nappes relativement petites et sont particulièrement fréquentes en domaines géologiques dits « de socle » (également appelés « socle cristallin »), que l'on retrouve au niveau de certains massifs français (Massif armoricain, Massif central, Vosges, Corse).

Enfin, les aquifères de milieux karstiques (retrouvés généralement en terrains calcaires ou crayeux) sont organisés en un réseau de drainage souterrain pouvant former (par dissolution de la roche) un ensemble de gouffres et de cavernes. Leur présence est donc totalement dépendante du caractère soluble des formations rocheuses et les écoulements d'eau peuvent y être très rapides, constituant parfois de véritables rivières souterraines. Bien que plus minoritaire à l'échelle nationale, c'est ce type d'aquifère qui se rapproche le plus d'une représentation des eaux souterraines sous forme de rivières et de lacs souterrains telle que véhiculée dans l'imaginaire collectif. Les capacités de stockage et de circulation de l'eau au sein de ces structures peuvent néanmoins être extrêmement variables en fonction de la densité de cavités présentes. De plus, la présence d'aquifères karstiques se traduit relativement souvent (suivant l'orientation des réseaux de drainage souterrains) par des transferts d'eau entre bassins versants topographiques — les précipitations rechargeant un bassin pouvant ainsi alimenter ensuite les cours d'eau d'un bassin adjacent.

Au final, chaque catégorie d'aquifères n'est pas toujours spécifiquement associée à une formation géologique particulière : par exemple, une formation calcaire peut conduire à la présence de milieux poreux comme de milieux karstiques. Parfois, suivant la nature des roches, il est également possible que les aquifères présentent plusieurs types de porosité simultanément : poreux-fissuré, poreux-karstique, fissuré-karstique, ou encore les trois en même temps (poreux-fissuré-karstique).

### Les liens entre caractéristiques du sous-sol et hydrologie en surface

En plus d'agir sur les capacités de stockage et de circulation de l'eau dans le milieu souterrain, la nature du sous-sol affecte généralement également les eaux de surface (à travers les échanges entre nappes et surface). Bien que la relation ne soit pas toujours absolue, cet impact du sous-sol sur l'hydrologie de surface peut être illustré en juxtaposant une

cartographie des cours d'eau français à une carte géologique — et en particulier au niveau de zones à l'interface entre différents domaines géologiques.

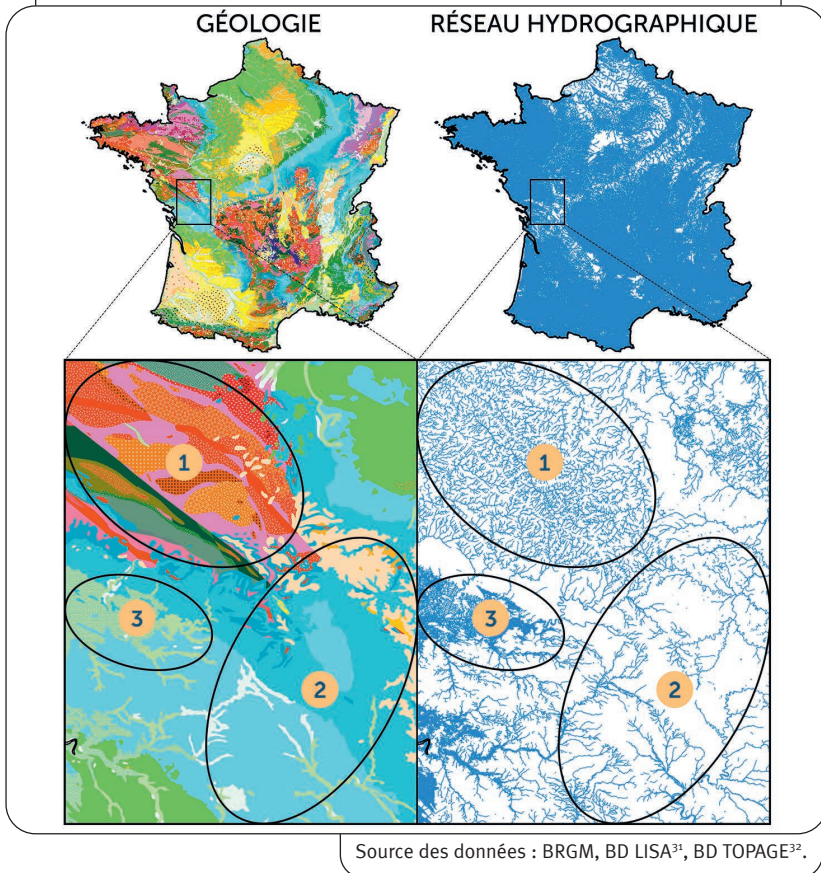
Ainsi, l'exemple d'une zone située à l'interface entre un domaine de socle et un domaine sédimentaire permet notamment de faire ressortir trois caractéristiques hydrographiques distinctes (fig. 2.4). Dans la mesure où, sur cette zone réduite, les conditions climatiques sont raisonnablement similaires, les différences observées peuvent ensuite être en partie reliées à des variations d'ordre géologique (qu'il est nécessaire d'également interpréter au regard de la topographie locale).

Tout d'abord, la partie correspondant à l'extrémité du Massif armoricain (domaine de socle) — principalement constituée de milieux fissurés (roches dites « cristallines », comme granites, schistes, gneiss...) — est aussi associée à un réseau hydrographique plutôt dense (fig. 2.4-1). Cette observation traduit ainsi la présence de nappes situées à relativement faible profondeur et interceptant régulièrement la topographie (c'est-à-dire étant fortement en relation avec la surface) — un comportement relativement caractéristique de ce type d'aquifère fissuré, qui se retrouve dans de nombreux autres territoires.

Ensuite, cet exemple intègre également un domaine sédimentaire principalement constitué de milieux karstiques et poreux (calcaire, marnes, gypse...) et caractérisé par un réseau hydrographique relativement peu développé (fig. 2.4-2). Bien que cette différence de réseau hydrographique avec le Massif armoricain soit également probablement en partie liée à la topographie (il est vraisemblable que cette zone soit légèrement moins vallonnée), elle illustre aussi une différence claire de comportement entre les types d'aquifères. En l'occurrence, les milieux à influence karstique ont généralement tendance à peu permettre la présence d'eau en surface (la majorité de l'eau circulant en quantité dans des réseaux de drainage en profondeur). Il est d'ailleurs facile d'observer qu'à l'échelle nationale cette formation rocheuse (en bleu sur la carte géologique) est quasiment systématiquement associée à un faible réseau hydrographique en surface (en blanc sur la cartographie des cours d'eau) (fig. 2.4). Il est néanmoins nécessaire de souligner qu'il ne s'agit pas de l'unique formation géologique à l'origine de la présence de milieux karstiques en France.

La zone utilisée en exemple s'illustre en outre par la présence du Marais poitevin, constitué de milieux poreux (sables, graviers, limons...) et présentant un réseau hydrographique extrêmement dense (fig. 2.4-3). Néanmoins, ce cas nécessite tout particulièrement de prendre en compte à la fois la topographie, mais également l'influence des activités humaines. En effet, cette zone est située au niveau d'un bas topographique qui, combiné à la nature des aquifères présents (permettant le stockage d'eau en quantité), conduit à une forte interconnexion entre les nappes et la surface et à la formation d'une vaste zone humide (la deuxième plus importante de France après la Camargue). La densité du réseau hydrographique doit aussi être mise en relation avec les aménagements anthropiques, et en particulier la construction d'un vaste réseau de canaux (composant la quasi-intégralité des cours d'eau référencés). Au final, la structure des réseaux hydrographiques sera ainsi dépendante d'une combinaison de facteurs alliant, notamment, géologie, climat, topographie et aménagements anthropiques.

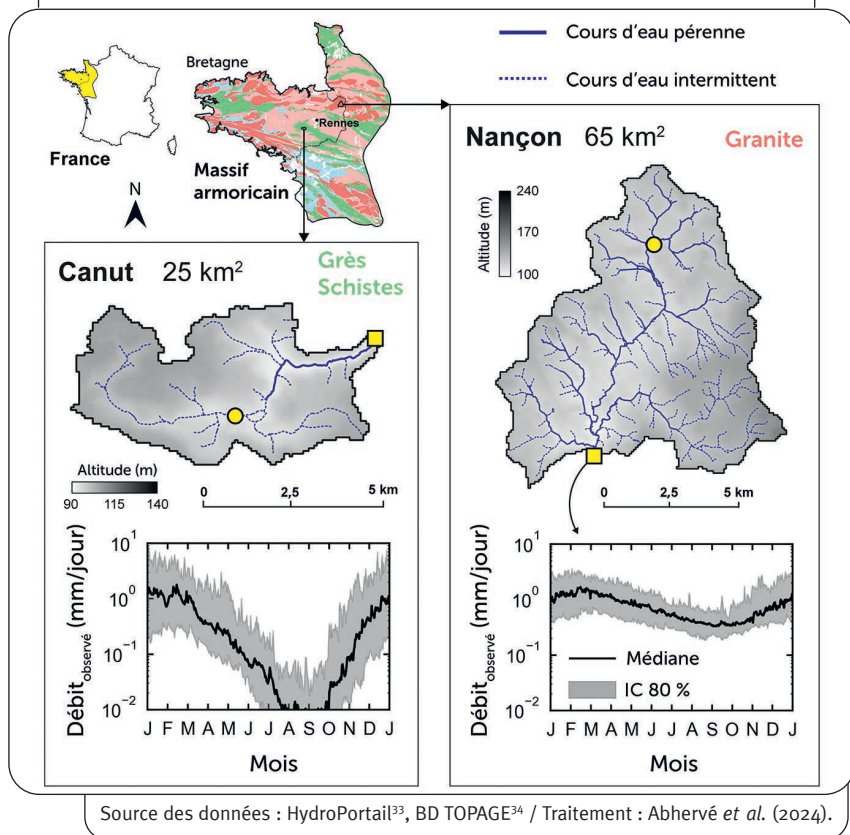
**Figure 2.4.** Exemple de comparaison entre structure géologique et réseau hydrographique, au niveau national (haut) et au niveau d'une zone d'interface entre domaine de socle (couleurs rouge, rose, orange...) et domaine sédimentaire (couleurs bleues, vert clair, beige...). (En bas) : (1) extrémité du Massif armoricain, principalement constituée de milieux fissurés et caractérisée par un réseau hydrographique dense ; (2) bassin sédimentaire, principalement constitué de milieux karstiques et poreux, et caractérisé par un réseau hydrographique peu développé ; (3) marais poitevin, constitué de milieux poreux et surtout d'une faible topographie (propice à la formation de zones humides), aménagé par les activités humaines en un réseau hydrographique très dense (canaux).



31. <https://bdlisa.eaufrance.fr/carte> (consulté le 18/08/2025).

32. <https://www.sandre.eaufrance.fr/atlas/srv/api/records/7fa4c224-fe38-4e2c-846d-dcc2fa7ef73e> (consulté le 18/08/2025).

**Figure 2.5.** Évolution annuelle des débits pour deux cours d'eau situés à proximité de Rennes, au sein de contextes géologiques différents. L'enveloppe grise représente 80 % des débits mesurés sur la période 1990-2022 (IC : intervalle de confiance), tandis que la courbe en noir correspond au débit médian. Afin d'être comparables entre eux, les débits sont rapportés proportionnellement à la taille de chaque bassin versant.



En plus de la structure du réseau hydrographique, il est possible d'illustrer l'impact du sous-sol sur l'hydrologie de surface à travers les débits des cours d'eau (Carlier *et al.*, 2018 ; Cornette, 2022). Pour cela, prenons un exemple (volontairement très contrasté) à partir des débits mesurés dans deux cours d'eau — tous deux situés à proximité de

33. <https://hydro.eaufrance.fr> (consulté le 18/08/2025).

34. <https://www.sandre.eaufrance.fr/atlas/srv/api/records/7fa4c224-fe38-4e2c-846d-dcc2fa7ef73e> (consulté le 18/08/2025).



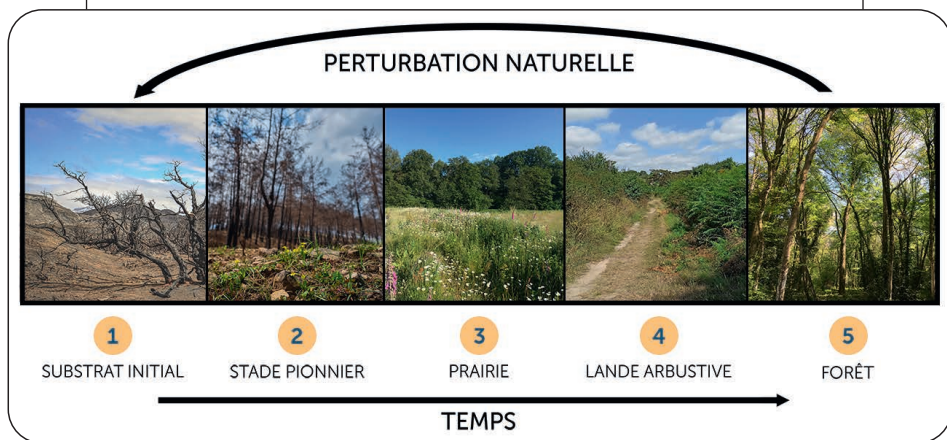
Rennes, mais au sein de couches géologiques différentes (fig. 2.5). Il ressort que, dans le cas du bassin versant composé de grès et de schistes, les débits ont tendance à chuter énormément durant la période estivale (le cours d'eau pouvant parfois même devenir intermittent), illustrant le fait que le milieu souterrain semble peu capable de soutenir les étiages. Au contraire, dans le cas du bassin versant composé de granite, les débits sont beaucoup plus constants sur l'année (variabilité des débits peu marquée), illustrant le fait que le milieu souterrain semble en mesure de mieux soutenir les étiages.

Bien que ces deux exemples soient situés dans un même domaine de socle (aquifères de milieux fissurés), la différence de dynamique des débits (et les valeurs à l'étiage) suggère une capacité de stockage plus importante au sein du bassin versant composé de granite — pouvant s'expliquer par une plus grande épaisseur d'aquifère et/ou la présence de fissures ou d'altérites plus capacitives. Évidemment, cet exemple n'a pas vocation à affirmer que les formations granitiques permettront systématiquement de mieux stocker l'eau dans le milieu souterrain que les formations schisteuses. Ces deux cours d'eau présentant des conditions relativement homogènes sur le plan du climat, de la topographie et des aménagements anthropiques, les différences observées servent uniquement à illustrer le rôle majeur que peut avoir le sous-sol sur ces débits et sur l'intermittence des cours d'eau.

## Les facteurs biologiques

La catégorie des facteurs biologiques regroupe un ensemble de facteurs issus du vivant et affectant indirectement le cycle de l'eau à travers des effets qui vont s'exercer en particulier sur la couverture du sol et le sol : la biodiversité, la succession écologique, les perturbations naturelles et les interactions biologiques. Ces facteurs sont généralement totalement absents des représentations classiques du cycle de l'eau, alors qu'ils ont des impacts significatifs sur les flux d'eau à l'échelle des bassins versants (évapotranspiration, ruissellement et infiltration). Cependant, s'il est important d'avoir conscience que ces facteurs existent et qu'ils contribuent au cycle de l'eau, ils ne constituent généralement pas l'élément le plus important et, de ce fait, seront uniquement évoqués brièvement ici.

Ainsi, comme mentionné précédemment, la couverture du sol et le sol sont à la fois le support et le produit du vivant, c'est-à-dire de la biodiversité (diversité des écosystèmes, des espèces, des gènes...), d'où l'importance que ce facteur soit également pris en considération. Ensuite, la biodiversité est elle-même fortement affectée par de nombreux facteurs biologiques. Parmi eux, nous trouvons, tout d'abord, la succession écologique, qui correspond à l'évolution naturelle de la végétation dans le temps. En effet, la nature est dynamique et en constante évolution. Par exemple, les milieux ouverts (prairies, landes...) auront tendance, en tout cas en France, à se refermer, colonisés petit à petit par les arbustes, puis les arbres, jusqu'à l'apparition d'une forêt. La forêt est également loin d'être un écosystème figé, la présence de perturbations naturelles et d'interactions biologiques permettant au cycle de recommencer (fig. 2.6) (Turner et Gardner, 2015).

**Figure 2.6.** Exemple simplifié de succession écologique en climat tempéré.

Les perturbations naturelles (tempêtes, inondations et crues, incendies, sécheresses, avalanches ou éruptions volcaniques), en tant que composant naturel des systèmes écologiques, peuvent de ce fait être un moteur de la dynamique des écosystèmes et de la biodiversité (si elles ne sont pas trop intenses ou fréquentes) (White, 1979). Elles n'affectent généralement pas les écosystèmes uniformément, conduisant à la création d'une mosaïque de zones perturbées et non perturbées (comme des trouées au sein de surfaces forestières) variant fortement en taille, forme, sévérité et agencement. Ainsi, la présence régulière d'incendies permet le maintien d'une mosaïque, en âges et en nombre d'espèces différentes, au sein d'écosystèmes tels que les forêts boréales et les prairies. De la même manière, les cyclones contribuent au maintien de la diversité et de la structure de nombreuses forêts tropicales. Les crues et inondations saisonnières sont également un processus naturel au sein de nombreuses rivières, contribuant à redessiner les cours d'eau et créer une diversité d'habitats terrestres et aquatiques (Humphries *et al.*, 2024).

Enfin, les interactions entre organismes (à la fois positives et négatives) — comme la prédation, la compétition ou la facilitation — constituent un autre moteur de la dynamique des écosystèmes et de la biodiversité. Par exemple, les herbivores contrôlent fortement la dynamique de la végétation dans de nombreux écosystèmes terrestres. Théoriquement, en absence de perturbations et en présence de conditions favorables (température, humidité), la dynamique naturelle de la plupart des écosystèmes terrestres tend à une évolution vers une végétation arborée. Ainsi, en l'absence d'herbivores, le paysage est généralement dominé par une végétation arborée ; tandis que lorsque les herbivores sont abondants, le paysage est généralement dominé par une végétation herbacée ou arbustive. La prédation affecte également indirectement la dynamique de la végétation, à travers un contrôle sur la dynamique des herbivores



(proies) : les prédateurs peuvent réguler les populations d'herbivores ainsi qu'altérer leur comportement (éviter certaines zones à risques). Certains organismes sont par ailleurs décrits comme des « ingénieurs » des écosystèmes, leur activité étant à la base de la structure de certains habitats (Wright et Jones, 2006). C'est notamment le cas des castors qui, à travers la création de barrages, sont responsables de la formation d'une mosaïque de zones humides. Et pour finir, certaines espèces sont aussi à la base de la structure de certains écosystèmes, fournissant un habitat et des conditions locales stables pour d'autres — elles sont pour cela nommées « espèces fondatrices » (Ellison *et al.*, 2005). C'est le cas notamment de certaines espèces d'arbres dans les écosystèmes forestiers ou encore des mousses de type sphaigne dans les tourbières.

### 3. Les impacts anthropiques et leurs conséquences physiques sur le cycle de l'eau

D'après la littérature scientifique, les activités humaines sont à la base d'un nombre varié mais interconnecté d'altérations du cycle de l'eau (Felfelani *et al.*, 2017). Premièrement, l'humanité s'approprie l'eau à travers des prélèvements directs (usages de l'eau bleue ; Wada *et al.*, 2014), l'exploitation de l'humidité du sol pour l'élevage, les cultures et la foresterie (usages de l'eau verte ; Schyns *et al.*, 2019), et le rejet de polluants (usages de l'eau grise ; Hoekstra et Mekonnen, 2012). Deuxièmement, les activités humaines ont été responsables de nombreux changements de couverture et d'usage des sols (déforestation, urbanisation, drainages...) (Wang-Erlandsson *et al.*, 2018), ainsi que d'aménagements des cours d'eau, conduisant à une altération durable des patrons de précipitations, de ruissellement (Gerten *et al.*, 2008), d'infiltration et d'évapotranspiration à l'échelle continentale (Falkenmark *et al.*, 2019). Troisièmement, le changement climatique induit par les activités humaines devient de plus en plus responsable d'altérations des stocks et des flux d'eau au niveau global (Haddeland *et al.*, 2014).

Si principalement des conséquences négatives sont traitées dans le cadre de cet ouvrage, il convient néanmoins de garder à l'esprit que les activités humaines abordées se sont également développées pour un certain nombre de bonnes raisons (développement économique local, prévention des inondations, production alimentaire...). Ce chapitre ne se veut donc pas critique envers les acteurs des territoires ayant contribué à l'émergence de toutes ces pressions sur le cycle de l'eau. L'objectif est ici uniquement de prendre un certain recul pour adopter une vision plus globale des conséquences générées par ces impacts anthropiques (qu'il sera nécessaire de remettre en perspective avec les bénéfices sociaux qu'ils apportent au regard du contexte local de chaque territoire). Les impacts anthropiques et leurs conséquences physiques sur le cycle de l'eau seront ainsi abordés au sein de quatre grandes catégories : les prélèvements d'eau (intégrant également les usages de l'eau ainsi que le cycle de l'eau en milieu urbanisé), les changements de couverture et d'usage des sols, l'aménagement des cours d'eau et le changement climatique.

#### Les prélèvements d'eau

En France métropolitaine, un volume moyen de 211 milliards de mètres cubes d'eau se renouvelle chaque année, apporté à la fois par les précipitations (précipitations efficaces) et, de façon minoritaire, par les cours d'eau arrivant des territoires voisins

(SDES, 2023). Cependant, seule une fraction de ce volume est prélevable pour les besoins humains, le reste étant nécessaire au fonctionnement des écosystèmes naturels. En moyenne, environ 31 milliards de mètres cubes sont prélevés (prélèvements bruts) chaque année par les activités humaines — à 82 % dans les ressources de surface (rivières, plans d'eau, stockages artificiels...) et à 18 % dans les ressources souterraines (nappes superficielles ou profondes) (Arambourrou *et al.*, 2024). Cette proportion entre eau souterraine et eau de surface est néanmoins très variable en fonction des territoires, selon les caractéristiques locales (et en particulier du type de sous-sol). Quoi qu'il en soit, au premier abord (si l'on raisonne à l'échelle annuelle sur tout le territoire national), il ne semble donc pas y avoir de déséquilibre comparé à l'eau se renouvelant chaque année. Néanmoins, les prélèvements les plus importants ont lieu en été, lorsque la disponibilité de la ressource est la plus faible, ce qui peut provoquer localement de fortes tensions, à la fois pour les écosystèmes, mais également entre usages anthropiques différents. De plus, sur certains territoires, les prélèvements peuvent dépasser la ressource renouvelable (par exemple lorsque les prélèvements d'eau souterraine dépassent le taux de recharge naturelle du milieu), accentuant encore plus ces tensions.

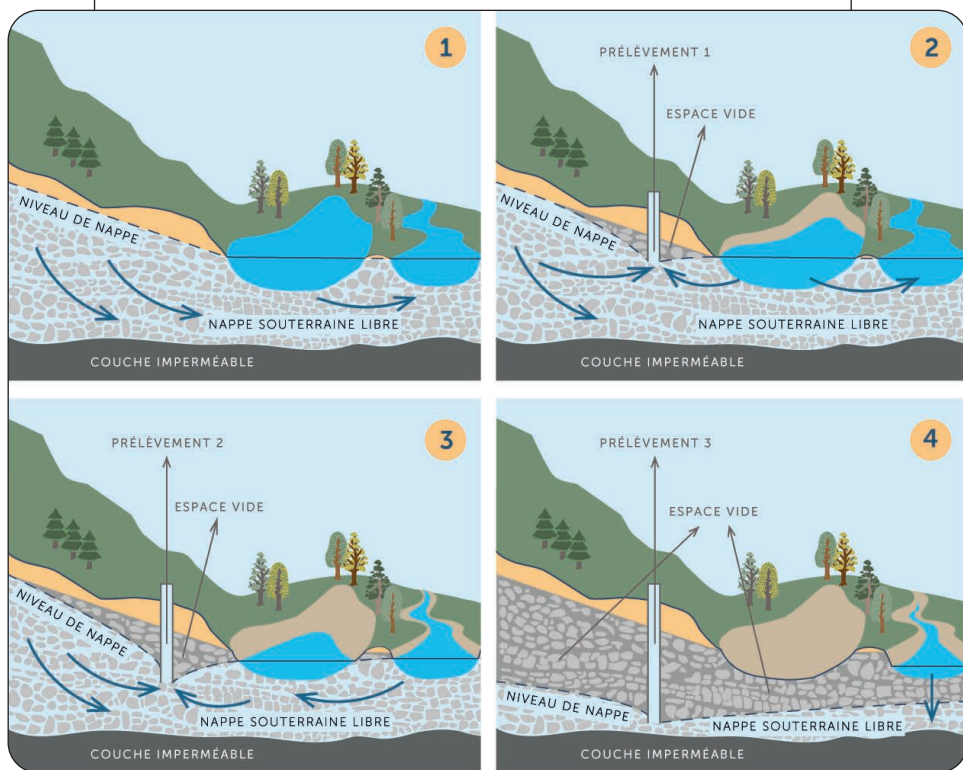
## **I Baisse des ressources en eau en surface et dans le milieu souterrain**

La conséquence des prélèvements d'eau (que ce soit dans les eaux de surface ou souterraines) est un retrait de cette ressource parmi les stocks naturels — et donc une raréfaction des ressources en eau douce pour les écosystèmes et d'autres usages anthropiques en aval (Döll *et al.*, 2012 ; Wada *et al.*, 2013 et 2014). En revanche, alors que, dans le cas de ressources de surface, l'effet des prélèvements est immédiat (baisse du débit des cours d'eau ou du niveau des plans d'eau), dans le cas de prélèvements dans les ressources souterraines, ce même effet peut être significativement décalé dans le temps (de l'ordre du mois à plusieurs décennies) (De Graaf *et al.*, 2019). Il a notamment été montré que l'effet (sur le milieu souterrain et en surface) de ces prélèvements variait fortement en fonction du régime d'interconnexion entre eau de surface et eau souterraine, de même qu'en fonction de l'intensité de prélèvement (niveau, fréquence, saisonnier ou continu) et de la distance au cours d'eau (fig. 3.1) (Gleeson et Richter, 2018).

Lors de prélèvements dans le milieu souterrain, une partie de l'espace de stockage (aquifère) se vide de son eau en formant ce qui est appelé un « cône de dépression ». Tant que les prélèvements restent inférieurs à la capacité de recharge du milieu souterrain, uniquement l'apport des eaux souterraines aux eaux de surface (soutien de base) est réduit, résultant malgré tout en une diminution des débits d'étiage durant la saison sèche (fig. 3.1-2). Lorsque les prélèvements sont plus soutenus, les eaux souterraines et les cours d'eau restent interconnectés, mais les échanges s'inversent : la diminution du niveau de la nappe est compensée par

l'infiltration d'eau depuis le cours d'eau (fig. 21-3). Finalement, l'extraction d'eau souterraine à des niveaux excédant la capacité de recharge (à partir des précipitations et des cours d'eau), sur de grandes étendues ou des périodes prolongées, conduit à une déconnexion durable entre les eaux souterraines et les cours d'eau, entraînant une diminution significative de l'ensemble des stocks naturels (fig. 3.1-4). Dans ce cas, les eaux souterraines ne sont plus une composante active du cycle hydrologique et deviennent une source non renouvelable d'eau, étant incapables d'assurer leur rôle de soutien d'étiage des cours d'eau durant les périodes sèches (Wada, 2016). À terme, les forages souterrains courent également le risque de se tarir complètement (Jasechko et Perrone, 2021).

**Figure 3.1.** Effets de différents taux de prélèvement dans les eaux souterraines. (1) Conditions naturelles, (2) taux de prélèvement limité, (3) taux de prélèvement intermédiaire, et (4) taux de prélèvement élevé.

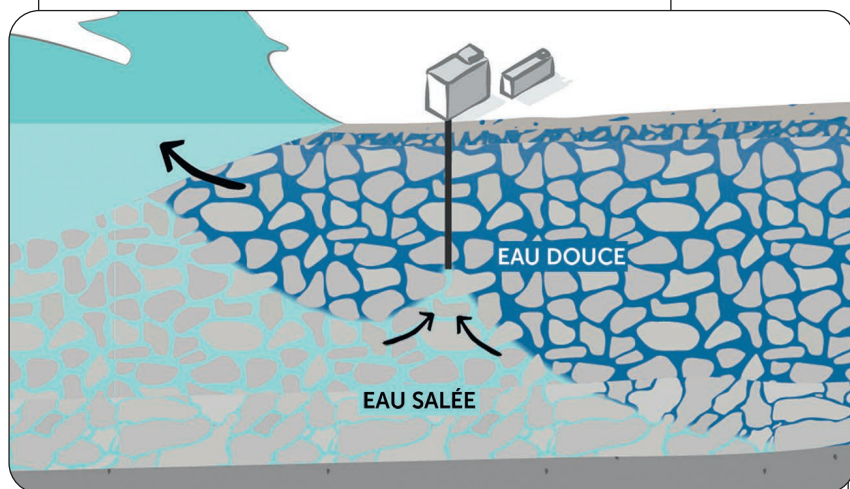


Source : © Water Family, d'après De Graaf *et al.* (2019).

## ■ Prélèvements en zone littorale et risques d'intrusion d'eau salée

Ajoutés à une raréfaction directe de la ressource en eau douce, des prélèvements trop importants dans les eaux souterraines littorales augmentent également le risque de contamination à partir d'intrusion d'eau marine salée (Werner *et al.*, 2013). En effet, à l'image de ce qui est représenté en figure 3.2, en zone littorale, une frontière naturelle (sous forme de biseau) se forme dans le milieu souterrain entre l'eau douce et l'eau salée. Étant plus lourde et visqueuse, l'eau salée peut, en cas de déséquilibre de pression (du fait d'un pompage trop important notamment), repousser la nappe d'eau douce, conduisant à une salinisation des captages d'eau — et aggravant donc indirectement la raréfaction des ressources en eau douce. À noter que d'autres facteurs peuvent contribuer à déséquilibrer la pression entre eau douce et eau salée et conduire également à une remontée du biseau salé : par exemple une diminution de la recharge des nappes souterraines, ou encore une élévation du niveau de la mer.

**Figure 3.2.** Exemple de remontée du biseau salé sous l'effet de prélèvements d'eau en zone littorale.



Source : Le cycle de l'eau produit par l'Institut d'études géologiques des États-Unis (U.S. Geological Survey) (Corson-Dosch *et al.*, 2023).

## ■ La création de stockages artificiels

De manière indirecte, les prélèvements impactent également le cycle de l'eau à travers la création de stockages (ou réservoirs) artificiels, dont le but est de venir compléter les stocks naturels. À l'échelle nationale, on comptabilise ainsi près de 670 000 stockages

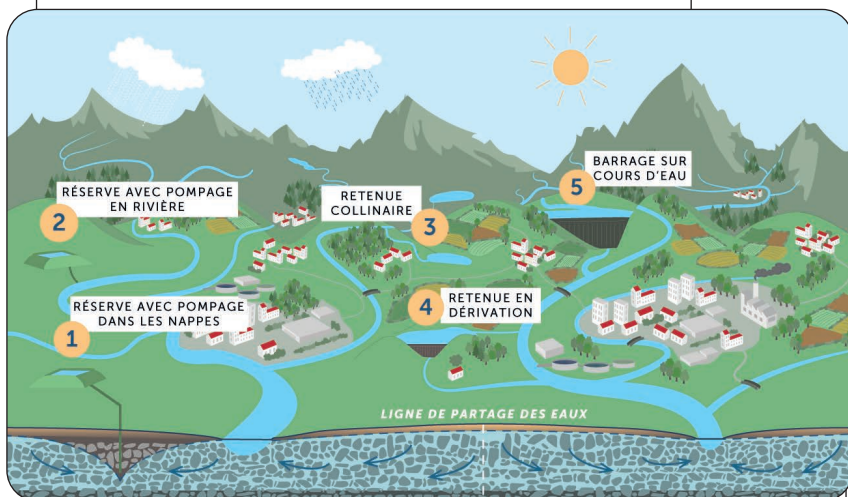
artificiels (pour une capacité de stockage cumulée estimée à 18 milliards de mètres cubes) (Arambourrou *et al.*, 2024), pouvant être distingués en différentes catégories :

- les réserves (dont font partie les dites « mégabassines »), alimentées soit par pompages dans les eaux souterraines soit par pompages en rivière ;
- les retenues collinaires, des aménagements de terrain (création de digues, creusement...) déconnectés des cours d'eau et alimentés par interception des eaux pluviales ;
- les retenues en dérivation, alimentées par gravité en déviant un cours d'eau ;
- et les barrages, construits directement au travers de cours d'eau (fig. 3.3).

Le terme « substitution », utilisé pour désigner certains ouvrages (par exemple les réserves de substitution agricoles), désigne le fait de prélever de l'eau lorsqu'elle est abondante (en période hivernale ou au printemps), pour ensuite l'utiliser en substitution de prélèvements (dans les rivières ou les nappes) lors des périodes d'étiage.

Ces stockages artificiels ont été régulièrement mis en avant pour leurs impacts significatifs sur l'environnement (Carluier *et al.*, 2025)<sup>35</sup>. Tout d'abord, dans le cas de barrages situés en travers de cours d'eau, le transport sédimentaire ainsi que la

**Figure 3.3.** Les différentes catégories de stockages artificiels selon leur type d'alimentation.



Source : © Water Family, adapté de Carluier *et al.* (2016).

35. [https://theconversation.com/barrages-et-reservoirs-leurs-effets-pervers-en-cas-de-secheresses-longues-111583#comment\\_2857186](https://theconversation.com/barrages-et-reservoirs-leurs-effets-pervers-en-cas-de-secheresses-longues-111583#comment_2857186) (consulté le 18/08/2025).

circulation des espèces (continuité écologique) se retrouvent fortement impactés. Ces aspects seront discutés plus en détail dans la section « L'aménagement des cours d'eau ». Ces stockages artificiels entraînent également souvent une dégradation de la qualité de l'eau (Carlier *et al.*, 2017), du fait de sa stagnation qui conduit à une augmentation de la température de l'eau, et à une prolifération bactérienne et algale (également accentuée par un enrichissement excessif de l'eau en éléments nutritifs, un phénomène appelé « eutrophisation »)<sup>36</sup>. Ces enjeux qualitatifs ne seront cependant pas plus détaillés au sein de cet ouvrage.

Surtout, ils sont responsables de modifications significatives du cycle hydrologique à l'échelle des bassins versants — notamment en augmentant la quantité d'eau s'évaporant naturellement et réduisant de fait notablement la ressource disponible (Rodrigues *et al.*, 2020). À l'échelle nationale, la perte d'eau par évaporation à partir de l'ensemble de ces stockages artificiels a ainsi été récemment estimée à environ un milliard de mètres cubes. Ce chiffre, pouvant sembler négligeable, est néanmoins à mettre en regard avec les 4,4 milliards de mètres cubes correspondant à la part d'eau consommée (c'est-à-dire non restituée au milieu naturel après usage, voir section « Les usages de l'eau ») pour l'ensemble des usages anthropiques. En d'autres termes, près d'un cinquième de notre consommation (et donc perte) d'eau au niveau national provient donc uniquement de ces stockages. Cependant, cet impact est très variable en fonction des caractéristiques de l'ouvrage et de sa localisation. Par exemple, cette perte d'eau par évaporation serait pour environ 75 % le fait de stockages de plus de 1 000 m<sup>2</sup>, et concernerait principalement certaines régions, comme le centre de la France (du fait de nombreuses retenues de petite taille), les Alpes (du fait de grands lacs de barrage), ou l'est du Bassin parisien (du fait des grands lacs de la Seine en amont de Paris). En revanche, certains stockages situés dans les zones montagneuses, comptant pour 15 % de la superficie totale, ne participeraient qu'à hauteur de 3 % à cette perte par évaporation (Arambourrou *et al.*, 2024).

De plus, ces stockages artificiels contribueraient à modifier significativement la réponse des cours d'eau et des nappes souterraines face aux sécheresses météorologiques (c'est-à-dire aux déficits de précipitations, voir plus haut la section « Les différents types de sécheresse »). Par exemple, de nombreuses études ont montré que la construction de stockages artificiels en amont de bassins versants avait été responsable d'une augmentation de la fréquence, de la durée et de l'intensité des sécheresses hydrologiques (déficit d'eau dans les cours d'eau et les nappes) dans les régions en aval (López-Moreno *et al.*, 2009). En particulier, il a été montré que le temps de propagation entre sécheresse météorologique et sécheresse hydrologique était significativement raccourci (Wu *et al.*, 2017), bien que cet effet dépende également fortement de la réglementation locale des ouvrages et des usages de l'eau auxquels ils visent à répondre (Lorenzo-Lacruz *et al.*, 2013). Par exemple, l'impact des stockages artificiels

36. <https://glossaire.eauetbiodiversite.fr/concept/eutrophisation> (consulté le 18/08/2025).



est généralement plus faible si les ouvrages ont pour objectif de soutenir les débits d'étiage — l'eau étant stockée temporairement, puis restituée au milieu naturel (dans ce cas, les impacts sont principalement liés à la problématique de l'évaporation et de la qualité de l'eau cités précédemment). En revanche, dans le cas de stockages à destination de l'irrigation, l'eau utilisée est en majorité captée par la végétation et retourne dans l'atmosphère (processus d'évapotranspiration) : il s'agit donc d'une perte nette d'eau pour le reste du bassin versant.

Il peut également être noté que la majorité des études se sont surtout intéressées à l'impact de gros ouvrages (à partir de grands barrages notamment) plutôt que de petits (comme de petites retenues agricoles), considérant que ces derniers avaient un effet mineur sur les dynamiques hydrologiques. Cependant, en tenant compte de la grande quantité et de la large distribution de ces petits ouvrages, plusieurs études récentes ont également mis en avant le fait que leur effet cumulé ne devrait pas être négligé (Habets *et al.*, 2018). La plupart des études sur le sujet montrent ainsi qu'un cumul de petits réservoirs pouvait conduire :

- à une réduction (jusqu'à 45 %) des pics de crues (Ayalew *et al.*, 2017), tout particulièrement du fait que certains de ces ouvrages sont également destinés à prévenir les inondations (Del Giudice *et al.*, 2014) ;
- et à une diminution des débits d'étiage, suivant une large variabilité (0,3 à 60 %) (Nathan et Lowe, 2012), du fait que l'eau stockée peut également servir à soutenir les débits d'étiage.

Au final, à l'échelle annuelle, il a été estimé que ces petits réservoirs étaient responsables d'une diminution du débit moyen des cours d'eau d'approximativement 13,4 % ( $\pm 8$  %), pouvant ainsi accentuer la raréfaction des ressources en eau douce.

Les stockages artificiels (qu'ils soient petits ou grands) ont ainsi toujours des impacts sur le cycle de l'eau (Carlier *et al.*, 2025). Cependant, leur impact peut varier fortement du fait de nombreux facteurs : les caractéristiques propres à chaque bassin versant (climat, topographie, géologie...) ; les caractéristiques propres à chaque ouvrage et les processus hydrologiques les affectant ; le nombre d'ouvrages et leur agencement en réseau ; la connexion entre chaque ouvrage et le cours d'eau ; et le mode de gestion (taux et période de prélèvement, soutien d'étiage<sup>37</sup>...). Il est donc nécessaire de prendre en considération tous ces facteurs lors de l'évaluation des impacts hydrologiques des stockages artificiels. Ces impacts seront propres aux spécificités de chaque territoire et dépendront aussi grandement des usages auxquels chaque stockage vise à répondre (prévention des inondations, soutien d'étiage, irrigation, alimentation en eau potable, production d'électricité...) — un même ouvrage pouvant d'ailleurs contribuer à plusieurs usages. De plus amples informations sont fournies pour les stockages de type « retenues collinaires » et « réserves de substitution », au chapitre 7 « Solutions techniques et technologiques », en fin d'ouvrage.

37. <https://glossaire.eauetbiodiversite.fr/concept/soutien-detiage>.



## Les usages de l'eau

Les prélèvements d'eau ont pour but de répondre à de nombreux usages anthropiques, tels que la production d'eau potable, les usages agricoles et industriels, ou encore la production d'énergie (refroidissement des centrales électriques ou production hydroélectrique) (SDES, 2023 ; Arambourou *et al.* 2025). Ne nécessitant pas de prélèvements à proprement parler, un certain nombre d'activités en lien avec la ressource en eau — comme la baignade, les sports nautiques, ou la pêche — constituent également un autre type d'usage de l'eau appelé « usages récréatifs ». Bien que ce type d'usage n'impacte pas nécessairement la ressource d'un point de vue quantitatif, il peut être très fortement impacté par les conséquences des autres usages de l'eau. En 2019, à l'échelle nationale, 49 % des 31 milliards de mètres cubes prélevés sont imputables au secteur énergétique, tandis que 16 % servent à l'alimentation des canaux de navigation (à partir des eaux de surface dans les deux cas)<sup>38</sup>. La part restante des prélèvements, répartie de manière égale entre les eaux de surface et les eaux souterraines, est destinée à la production d'eau potable (17 % des prélèvements), à l'agriculture (10 % des prélèvements, principalement pour l'irrigation) et aux autres activités économiques, principalement industrielles (8 % des prélèvements). Cependant, l'origine (surface ou souterrain) des prélèvements est très variable en fonction des territoires et des usages de l'eau : elle peut être exclusivement souterraine sur certains territoires et certains usages, et exclusivement superficielle sur d'autres. De la même manière, la proportion d'eau prélevée pour chacun de ces usages est également très variable en fonction des territoires (fig. 3.4).

### ■ La BNPE et les incertitudes sur les prélèvements et les usages de l'eau

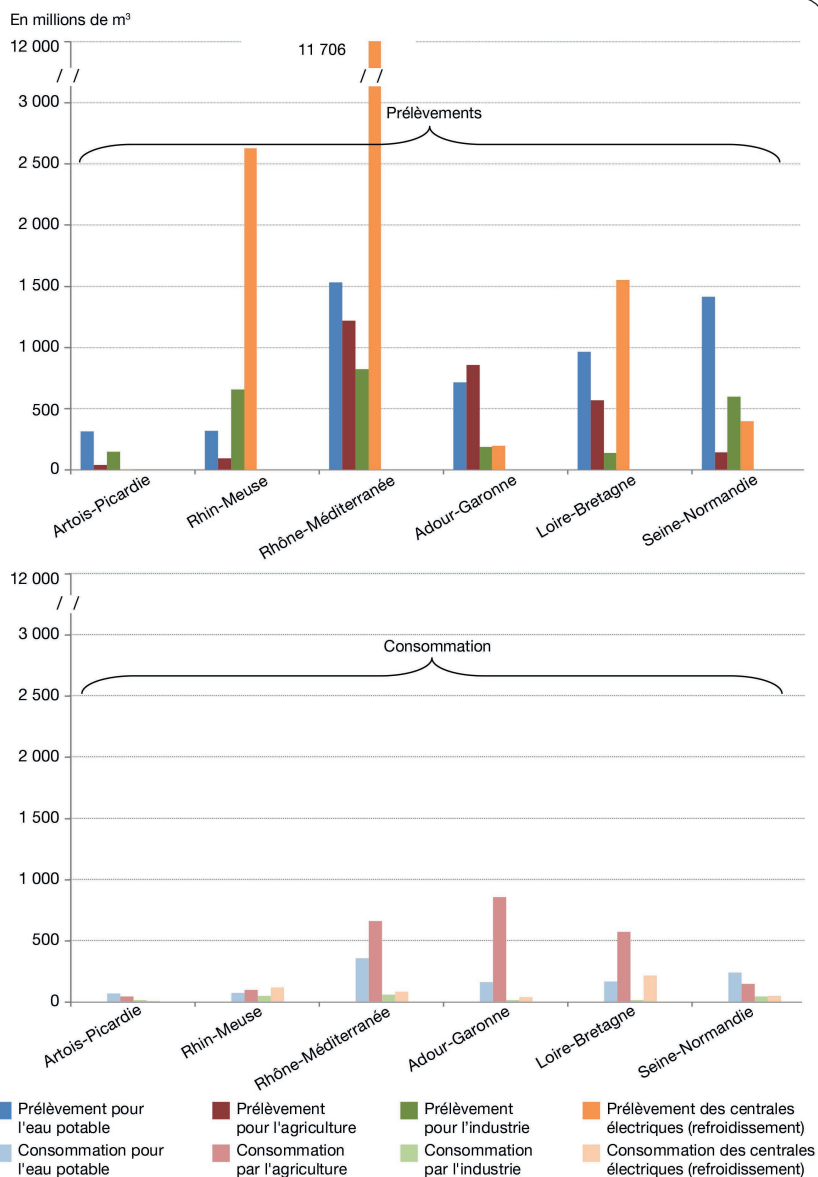
En France, il existe encore des incertitudes significatives concernant les prélèvements d'eau. En effet, les proportions rapportées précédemment ne tiennent compte que des données de prélèvement (volumes prélevés mesurés ou estimés) soumises à déclaration auprès des agences de l'Eau par les usagers assujettis à une redevance pour prélèvement. Ces prélèvements d'eau, recensés *via* la Banque nationale des prélèvements quantitatifs en eau (BNPE)<sup>39</sup> de l'Office français de la biodiversité (OFB), ne concernent ainsi que les volumes supérieurs à 10 000 m<sup>3</sup> d'eau par an (ou 7 000 m<sup>3</sup> en zones de répartition des eaux [ZRE], c'est-à-dire des zones de tension sur la ressource en eau<sup>40</sup>).

38. <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/economie/l-utilisation-des-ressources-naturelles-ressources/article/les-prelevements-d-eau-douce-par-usages-et-par-ressources> (consulté le 18/08/2025).

39. <https://bnpe.eaufrance.fr> (consulté le 18/08/2025).

40. <https://www.lesagencesdeleau.fr/ressources/les-zones-de-repartition-des-eaux-zre> (consulté le 18/08/2025).

**Figure 3.4.** Prélèvements et consommation (en millions de m<sup>3</sup>) d'eau douce par bassin hydrographique en France (moyenne 2010-2020).



Source des données : BNPE ; EDF ; Sispea / Traitement : SDES, 2023.

En revanche, un certain nombre de prélèvements ne sont pas connus : les prélèvements illégaux non déclarés bien qu'ils soient supérieurs au seuil de déclaration ; les prélèvements déclarés, mais de manière sous-estimée (la déclaration pouvant être une estimation, ce phénomène n'est pas nécessairement malhonnête) ; les prélèvements légaux non recensés, qui sont simplement inférieurs au seuil de déclaration pour apparaître dans les données (c'est notamment le cas des nombreux prélèvements par des particuliers à l'échelle nationale). Si, pris individuellement, chacun de ces prélèvements peut sembler anecdotique, il convient néanmoins de se poser la question de leur effet cumulé qui est certainement non négligeable dans certains bassins versants et à certaines périodes de l'année. À titre d'exemple, selon de récentes estimations, les forages domestiques représenteraient ainsi près de 1 % (~ 310 millions de mètres cubes) des volumes totaux prélevés annuellement pour tous les usages anthropiques (Arambourrou *et al.*, 2024) — soit près de 3 % des prélèvements en ne prenant en compte que l'eau potable, l'agriculture et l'industrie.

Ces grandes catégories de prélèvements déclarés peuvent également masquer des différences d'usages. Par exemple, les prélèvements déclarés pour l'alimentation en eau potable (AEP) incluent bien entendu les usages domestiques (c'est-à-dire les besoins en eau du quotidien pour boire, se laver, cuisiner...), mais peuvent aussi inclure certains usages industriels (pour le rinçage de produits manufacturés, le lavage des ateliers...) et agricoles (pour l'abreuvement du bétail, le lavage des bâtiments d'élevage...) raccordés au réseau d'eau potable. L'alimentation en eau potable inclut par ailleurs les besoins en eau des collectivités (établissements scolaires, restauration collective, infrastructures sportives, centres techniques, défense contre les incendies...) et du secteur tertiaire (hôtellerie, restauration, commerces, campings, bureaux...). Au sein de cette catégorie « eau potable », il est ainsi difficile de distinguer clairement les différentes catégories d'usagers (notamment par rapport à l'eau domestique). Dans les travaux les plus récents s'intéressant à cette question, il a été estimé qu'environ 20 % des volumes d'eau déclarés en tant qu'usage « eau potable » correspondraient à des usages non domestiques (Arambourrou *et al.*, 2024).

Ensuite, la BNPE recense les usages relatifs à l'industrie et aux activités économiques non raccordés au réseau d'eau potable (c'est-à-dire issus de prélèvements privés dans les eaux souterraines ou de surface). Cependant, cette catégorie englobe en fait tous les usages économiques hors irrigation et énergie et il est très difficile d'y faire la distinction entre chaque usage (pouvant concerner à la fois des industries, la production de neige de culture, des usages agricoles liés à l'abreuvement du bétail ou le nettoyage des équipements...). Malgré ces incertitudes, il est néanmoins vraisemblable que la majorité de ces prélèvements vise généralement à répondre à des usages industriels sur la plupart des territoires.

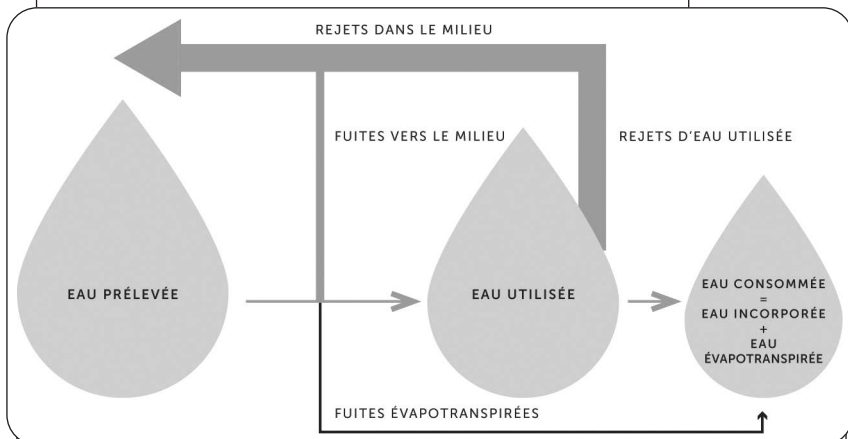
Concernant les usages déclarés « Irrigation », il n'y a en revanche pas de confusion possible, cette catégorie recensant uniquement l'irrigation agricole. Il serait cependant généralement nécessaire d'inclure également une partie des usages déclarés en

catégories « Eau potable » et « Industrie et activités économiques » pour obtenir la totalité des usages agricoles déclarés sur un territoire. Enfin, les données disponibles dans la BNPE étant déclarées à l'échelle annuelle, elles ne permettent pas d'identifier des tensions saisonnières. Par exemple, en période de tension sur la ressource, certaines exploitations agricoles se reportent sur le réseau d'eau potable lorsque leurs forages domestiques ne sont plus suffisants — augmentant donc de façon notable la demande en eau au sein de réseaux n'étant pas forcément dimensionnés pour ces besoins. Il est donc important de garder à l'esprit les limites intrinsèques à ces données lorsqu'elles sont mobilisées à l'échelle d'un territoire — en particulier, le fait qu'elles sous-estiment généralement la part agricole des prélèvements.

### ■ La différence entre prélèvement d'eau et consommation d'eau

Il est important de faire la distinction entre eau prélevée et eau consommée en fonction des différents usages (fig. 3.5). En effet, une partie de l'eau prélevée peut être restituée au milieu naturel après certains usages, tandis que l'eau consommée correspond à la partie de l'eau prélevée n'ayant pas pu être restituée (on parle alors de prélèvements nets). Si cette proportion d'eau restituée au milieu naturel est relativement élevée dans le cas de l'eau potable, de la production d'énergie ou d'usages industriels, elle est en revanche beaucoup plus faible dans le cas d'usages agricoles — il s'agit principalement d'eau pour l'irrigation, qui est captée par les plantes cultivées et ensuite transpirée dans l'atmosphère. C'est cette raison qui explique qu'à l'échelle nationale, même si l'agriculture n'est pas l'activité recensant les plus importants prélèvements

**Figure 3.5.** Différence entre eau prélevée et eau consommée.



Source : © Water Family, adapté de Vandecasteele *et al.* (2014) et d'Arambourrou *et al.* (2024).

bruts d'eau, elle l'est en termes de consommation (prélèvements nets) : pour 2020 (chiffres les plus récents), elle représentait ainsi 62 % du total, devant l'eau potable (14 %) — incluant eau domestique (12 %), secteur tertiaire (1 %) et loisirs (1 %) —, le refroidissement des centrales électriques (14 %), les usages industriels (9 %), et l'alimentation des canaux (1 %) (Arambourrou *et al.*, 2024). Cette répartition est néanmoins variable selon les bassins hydrographiques (voir fig. 3.4) : entre 2010 et 2020, l'eau consommée était attribuée majoritairement à l'agriculture dans les bassins Adour-Garonne (81 % du total d'eau consommée), Loire-Bretagne (60 %) et Rhône-Méditerranée (57 %) ; à l'eau potable, en Artois-Picardie (55 %) et en Seine-Normandie (51 %) ; et à la production d'électricité, en Rhin-Meuse (35 %) (SDES, 2023).

## ■ Usages de l'eau et dégradation de la qualité de l'eau

Bien que cet ouvrage n'aborde qu'à la marge cet enjeu, il est nécessaire de mentionner brièvement l'aspect qualitatif de l'eau restituée. En effet, même si certains usages permettent la restitution d'une bonne partie de l'eau prélevée dans le milieu naturel, des polluants peuvent persister dans les rejets, rendant cette eau inutilisable pour les écosystèmes ou impropre à d'autres usages en aval. Autre forme de pollution, l'eau peut être enrichie en éléments nutritifs (phosphore, azote...), conduisant à un phénomène d'eutrophisation du milieu et à un développement excessif de plantes et algues qui vont provoquer une asphyxie des écosystèmes (Smith *et al.*, 1999 ; Bouwman *et al.*, 2002). Certains usages — comme le refroidissement des centrales électriques — peuvent également être responsables d'une dégradation de la qualité de l'eau sur le plan de sa température, du fait de rejets d'eaux plus chaudes. La température de l'eau et le courant étant deux facteurs très importants pour la survie des écosystèmes aquatiques, un réchauffement des eaux de surface peut impacter significativement la vie aquatique des cours d'eau (Allan et Castillo, 2007) — en particulier si l'on considère que cette augmentation peut de même entraîner une baisse d'oxygénation de l'eau ainsi qu'une eutrophisation du milieu (toutes deux liées à la température de l'eau). Aussi, même si d'un point de vue quantitatif les volumes d'eau peuvent être conséquents, une dégradation de la qualité de l'eau peut également entraîner une raréfaction des ressources en eau douce disponibles (c'est-à-dire utilisables). Il apparaît ainsi que tout prélèvement, indépendamment de la part restituée ou non au milieu, aura nécessairement des effets sur les usages en aval et sur les écosystèmes.

## ■ Impacts spatiaux et temporels des prélèvements et des usages de l'eau

Outre les aspects quantitatifs et qualitatifs évoqués précédemment, il est également important de mentionner des effets d'un point de vue spatial — l'eau étant parfois restituée dans un milieu différent du milieu d'origine (par exemple lorsque des prélèvements dans les eaux souterraines sont restitués en surface) — et temporel, du fait

d'un décalage (pouvant être de l'ordre de plusieurs mois) dans le temps de restitution, comme dans le cas de retenues. Certains prélèvements peuvent aussi être restitués sur d'autres bassins versants, modifiant ainsi les limites des bassins versants qui ne sont alors plus nécessairement « topographiques », voire directement en mer (en cas de territoires littoraux), conduisant donc à une perte nette d'eau pour le bassin émetteur.

## ■ Le cas particulier de la gestion du manteau neigeux

Certains territoires présentent la particularité d'avoir des usages de l'eau liés aux activités économiques de montagne (stations de ski). La gestion du manteau neigeux, en particulier le damage et la production de neige de culture (c'est-à-dire la production artificielle de neige sur les pistes de ski avant et pendant la saison de ski), est ainsi devenue une activité courante dans de nombreux bassins versants montagneux (Steiger *et al.*, 2019). Cet usage assez singulier — pouvant être comptabilisé en eau potable ou en usages industriels (suivant qu'il utilise de l'eau potable ou qu'il soit issu de prélèvements non raccordés à l'eau potable) — mérite de s'y attarder du fait de la place qu'il a prise ces dernières années dans les espaces publics et médiatiques. Au premier abord, et comme le mettent en avant les partisans du tourisme de ski, son effet pourrait sembler neutre, dans la mesure où l'eau n'est « qu'empruntée » afin d'augmenter le manteau neigeux en hiver, puis est restituée pour le ruissellement et l'infiltration au moment de la fonte des neiges. Cependant, l'utilisation de quantités importantes d'eau pour l'enneigement est de plus en plus décriée du fait de la pression que cet usage pourrait exercer sur les bassins versants de montagne.

Néanmoins, malgré les problèmes soulevés, très peu d'études se sont jusqu'à présent penchées sur l'influence de cette gestion du manteau neigeux, et en particulier de la production de neige de culture, sur le cycle hydrologique (à l'échelle locale ou régionale). Des études pionnières sur ce sujet avaient été menées au Colorado (États-Unis) à la fin des années 1980 (Eisel *et al.*, 1988) et avaient mis en avant des pertes significatives du fait de phénomènes d'évaporation et de sublimation atmosphérique, survenant à deux niveaux différents. Tout d'abord, une perte « initiale » de l'ordre de 10 % du volume d'eau utilisée serait inhérente au processus de production de neige de culture en lui-même (au niveau du canon à neige), survenant lors de la solidification des gouttelettes de glace en sphères de glace. Cette estimation fut corroborée par des études plus récentes à l'échelle européenne (Spandre *et al.*, 2016 et 2017 ; Grünewald et Wolfsperger, 2019). Une perte « ultérieure » pourrait ensuite survenir du fait d'autres phénomènes d'évaporation et de sublimation affectant (de la même manière que la neige « naturelle ») la neige de culture une fois celle-ci déposée sur les pistes de ski. Dans le cas de l'étude au Colorado, la perte totale (en cumulant cette perte « ultérieure » aux 10 % de perte « initiale ») recouvrait de 13 à 37 % de l'eau utilisée (Eisel *et al.*, 1990). Cependant, ses auteurs avaient également clairement indiqué que leurs résultats ne pouvaient être transposés sur d'autres territoires du fait que ces pertes sont très dépendantes des conditions locales (température atmosphérique lors du processus de fabrication de la neige

de culture, températures et précipitations pendant l'hiver sur ce domaine skiable, caractéristiques du bassin versant...). Au début des années 2000, une autre étude portant sur deux autres domaines skiables américains enregistrait une perte totale de l'ordre de 3 à 4 % — rapportée au volume de précipitations annuelles cette fois-ci (Wemple *et al.*, 2007) — ce qui n'est pas totalement anecdotique.

Tout récemment, une étude s'est penchée sur cette question dans le cas de la station de ski savoyarde de La Plagne à l'aide de simulations numériques (c'est-à-dire à l'aide d'une approche de modélisation) (Morin *et al.*, 2023). Cette étude montre ainsi qu'à part la perte « initiale » de 10 % de l'eau utilisée inhérente au processus de fabrication de neige de culture, dans la situation prévalant dans les Alpes françaises du Nord, il y a peu ou pas de perte supplémentaire d'eau. Rapporté aux précipitations à l'échelle annuelle, cela représenterait ainsi une perte estimée des ressources en eau de l'ordre de 1 à 2 % (la quantité d'eau utilisée pour la production de neige de culture représentant une fraction de 10 à 20 % des précipitations annuelles totales, ce qui, à nouveau, est loin d'être anecdotique). Cette faible perte ultérieure au processus de fabrication de la neige de culture s'explique du fait que, dans le cas de La Plagne, les pistes de ski couvrent seulement 10 % de la surface des bassins versants où la station est située, et que les équipements d'enneigement ne couvrent que 40 % de la surface des pistes.

En plus de cet impact hydrologique limité (mais pas nul pour autant) à l'échelle annuelle, les auteurs soulignent un impact à l'échelle saisonnière, notamment du fait du damage, qui élimine pratiquement la fonte des neiges en hiver, décalant ainsi le début de la fonte des neiges. Il en résulte un flux de fonte plus faible (de l'ordre de 10 à 20 %) pendant la période hivernale (réduisant donc les débits des cours d'eau), compensé par des quantités plus importantes par la suite. Le problème est que, dans les zones de montagne, la majorité des précipitations hivernales se produisant sous forme de neige, les eaux de surface et les eaux souterraines sont donc tributaires de la fonte du manteau neigeux pour se reconstituer. Cette gestion anthropique du manteau neigeux intervient ainsi à un moment de l'année où le débit des cours d'eau est généralement faible (en particulier si la production de neige de culture vise à répondre à un déficit de chutes de neige). De telles variations saisonnières peuvent par conséquent créer de fortes tensions sur la ressource en eau, en particulier mises en parallèle avec la demande en eau potable qui est généralement la plus importante durant la période hivernale afin de répondre aux besoins liés au tourisme de ski lui-même. Ce problème peut d'ailleurs être encore plus exacerbé si la production de neige de culture est effectuée à partir de prélèvements directs dans les cours d'eau ou les nappes (contrairement à des prélèvements dans un stockage artificiel, qui présente également ses inconvénients). De plus, ces différents usages doivent également être mis en balance avec la vulnérabilité des écosystèmes durant cette période de l'année.

Quoi qu'il en soit, cette étude, malgré ses limites que les auteurs rappellent bien (l'approche de modélisation utilisée notamment), permet d'apporter quelques éclairages concernant l'impact hydrologique de la production de neige de culture. Il en ressort

que, malgré des impacts avérés, cette pression anthropique conduit principalement à un changement modéré dans la formation de la couverture neigeuse et des processus de fonte des neiges, jouant, par exemple, un rôle moins important que l'influence du changement climatique futur sur l'hydrologie des montagnes. Ce résultat invite ainsi à contraster la comparaison qui est parfois faite de cet usage avec l'irrigation agricole (Steiger *et al.*, 2019), dont la consommation nette d'eau (du fait de l'évapotranspiration) reste sans commune mesure avec ce qui est rapporté ici. De plus, si la production de neige de culture a également souvent recours à des stockages artificiels (par exemple des retenues collinaires), la perte par évaporation de ces ouvrages est bien plus faible en zone de montagne qu'en zone de plaine (du fait de températures plus froides). Cette conclusion ne prend cependant pas en compte l'ensemble des autres problèmes soulevés par ce type de stockage artificiel (impacts sur la biodiversité et sur les paysages de montagne), pas plus que l'impact plus global du tourisme du ski que ce type d'usage de l'eau vise à soutenir.

## Le petit cycle de l'eau

Le « petit cycle de l'eau » (comparativement au « grand cycle de l'eau », c'est-à-dire le cycle naturel décrit plus haut) désigne le parcours emprunté par l'eau dans le cadre de son usage sous forme d'eau potable — incluant les installations et le circuit mis en place afin de la rendre potable puis d'assurer le traitement des eaux usées.

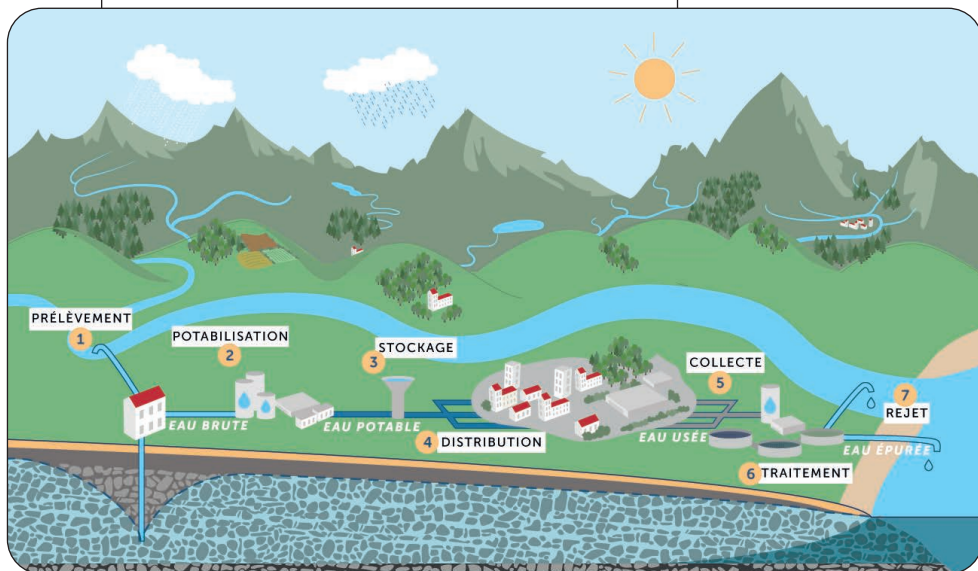
### **■ La production de l'eau potable et son assainissement**

Depuis son point de captage (dans les eaux de surface ou les eaux souterraines) jusqu'à son rejet dans le milieu naturel, le petit cycle de l'eau se compose de sept grandes étapes (fig. 3.6). Une fois prélevée dans le milieu naturel (1), l'eau brute est acheminée jusqu'à une station de potabilisation (2) où elle subit divers traitements — notamment de filtration et de désinfection (dont l'intensité dépend de la qualité de l'eau brute prélevée) — afin de permettre sa consommation sans risques pour la santé humaine. L'eau potable produite est ensuite stockée (3), puis distribuée par un réseau de canalisations et de branchements (4) jusqu'aux robinets des usagers. Les infrastructures de stockage (notamment les châteaux d'eau) permettent de disposer d'une réserve pour s'adapter aux variations de la demande des usagers. Elles sont généralement positionnées en hauteur, afin de fournir ensuite suffisamment de pression pour la distribution de l'eau. Après usage, les eaux dites « usées » — constituées des eaux-vannes (issues des toilettes) et des eaux ménagères (issues des lavabos, douches, cuisines, lave-linge...) — sont collectées (5) et transitent dans des réseaux d'assainissement dédiés (le « tout-à-l'égout ») vers des stations de traitement des eaux urbaines ou stations d'épuration (6), on parle alors d'assainissement collectif. Après traitement, l'eau épurée est restituée dans le milieu naturel (7), le plus souvent



dans les rivières ou dans la mer (en zone littorale). Dans le cas où les habitations sont situées à une trop grande distance d'un réseau d'assainissement collectif, elles doivent être équipées d'un dispositif autonome d'assainissement des eaux usées : on parle alors d'assainissement « non collectif » (ou individuel ou autonome).

**Figure 3.6.** Les grandes étapes du petit cycle de l'eau.



Source : © Water Family, adapté de l'OFB / Matthieu Nivesse (d'après OIEau)<sup>41</sup>.

Certaines installations industrielles ou agricoles sont également raccordées au réseau d'eau potable et génèrent donc des eaux usées. Cependant, dans ce cas, on parle alors d'effluents industriels ou agricoles et leur épuration relève de la responsabilité de l'exploitant. Pour cela, il est possible de passer un contrat avec une station d'épuration située à proximité, ou bien de se doter d'un équipement adapté. Dans le cas où les eaux usées sont trop polluées pour en permettre l'épuration, elles sont envoyées en centre de traitement spécialisé afin d'être éliminées en tant que déchets dangereux.

À noter qu'avec le temps les réseaux vieillissent et fuient. Ainsi, en 2020, la moyenne pondérée du taux de fuite des réseaux d'eau potable à l'échelle nationale s'élevait à 20 % : pour cinq litres mis en distribution, un litre n'atteint pas le consommateur (Arambourrou *et al.*, 2024). Ces pertes nécessitent cependant d'être nuancées, dans la mesure où, hormis la petite proportion captée puis évapotranspirée par le sol et la

41. <https://www.eaufrance.fr/leau-potable-et-l-assainissement> (consulté le 18/08/2025).

végétation, la grande majorité de l'eau qui fuit des réseaux vers le sol revient ensuite au milieu (bien que parfois dans un milieu différent) (fig. 3.7). En revanche, les fuites survenant sur le réseau d'assainissement peuvent être une source de pollution pour le milieu naturel, si elles conduisent à relâcher de trop grandes quantités d'eau non traitée dans l'environnement. Des fuites sur ces réseaux peuvent également avoir l'effet inverse lorsqu'ils ne transportent pas beaucoup d'eau : la canalisation agit alors à la manière d'un drain, pouvant contribuer à un assèchement des sols.

## ■ La gestion des eaux pluviales

En zone urbaine, la présence de surfaces imperméables (toitures, routes, parkings...) génère d'importants ruissellements lors des événements pluvieux. Bien qu'elles ne soient initialement pas considérées comme des eaux usées, ces eaux dites « pluviales » étaient historiquement collectées au sein des mêmes réseaux de tout-à-l'égout (dits « réseaux unitaires »), rejoignant ainsi le petit cycle de l'eau<sup>42</sup>. Néanmoins, cette méthode s'est avérée poser de nombreuses difficultés lors des fortes pluies (par exemple en cas d'orages), augmentant considérablement le volume d'eaux usées et pouvant alors dépasser les capacités de traitement des stations d'épuration. Dans ce cas, de l'eau non traitée peut être rejetée dans le milieu par des déversoirs d'orage (sortes de « soupapes de sécurité » implantées sur le réseau), générant des pollutions pour les milieux récepteurs.

Afin de résoudre ce problème, en zone urbaine, les réseaux unitaires sont progressivement remplacés par des réseaux dits « séparatifs », c'est-à-dire collectant les eaux pluviales séparément des eaux usées et évitant de surcharger les stations de traitement. Néanmoins, ces eaux pluviales sont souvent chargées en polluants et déchets (issus du ruissellement) et ne peuvent donc pas être restituées directement dans le milieu naturel. Elles doivent donc, au préalable, être stockées temporairement dans des bassins dédiés, permettant à la majorité des particules et déchets de se déposer par sédimentation. À noter que, dans certains cas, les réseaux d'eaux pluviales peuvent également contribuer à modifier les limites des bassins versants (qui ne sont alors plus nécessairement topographiques) — conduisant à générer plusieurs exutoires (Jankowsky *et al.*, 2013 ; Bacot *et al.*, 2022). Actuellement, l'objectif est donc plutôt de gérer autant que possible les eaux pluviales « à la parcelle », en favorisant leur infiltration localement plutôt que leur collecte par des réseaux.

## ■ Les changements de couverture et d'usage des sols

La conversion des terres est une autre composante majeure de la modification de l'environnement par les activités humaines. Les changements de couverture (forêts,

42. <https://www.eaufrance.fr/lassainissement-des-eaux-usees-domestiques> (consulté le 18/08/2025).

cultures, prairies...) et d'usage (résidentiel, agricole, récréatif...) des sols réfèrent à la manière dont l'exploitation anthropique des terres émergées a évolué au cours du temps (Turner *et al.*, 1995). Bien qu'ayant permis de répondre à nos besoins toujours plus croissants, ces changements ont cependant significativement impacté les processus hydrologiques, altérant l'équilibre hydrique de la végétation et des sols, et affectant les flux d'eau à l'échelle continentale (précipitations, évapotranspiration, infiltration, et ruissellement) (Warburton *et al.*, 2012). Ces changements peuvent néanmoins légèrement différer dans leurs réponses hydrologiques suivant le type de végétation présent (prairies, cultures...) et les pratiques utilisées (drainage, travail du sol, usage de produits phytosanitaires, irrigation...). Dans ce contexte, plusieurs grandes catégories de changements de couverture et d'usage des sols — et leurs conséquences sur le cycle de l'eau — seront abordées dans les sections suivantes.

### **■ La conversion d'espaces naturels en zones urbaines et agricoles**

De manière générale, la conversion d'espaces naturels en zones agricoles ou urbaines conduit à :

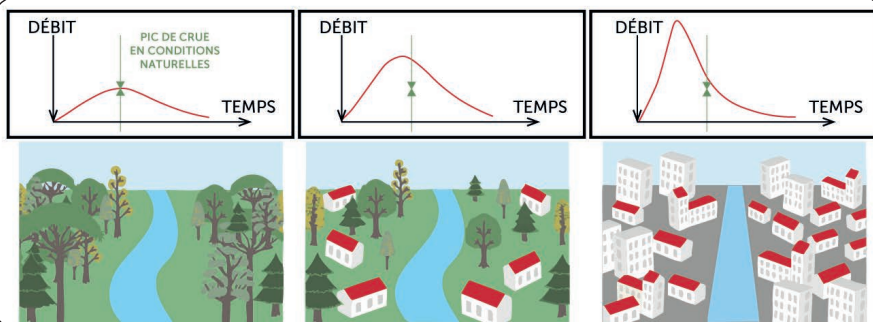
- une diminution de l'évapotranspiration du fait d'une perte de végétation (Eshleman, 2004) ;
- une diminution des capacités d'infiltration des sols du fait d'une réduction de leur perméabilité ;
- une augmentation du ruissellement de surface du fait d'une imperméabilisation des sols ou de la présence de systèmes de drainage (Costa *et al.*, 2003) (plus de détails sur les drainages sont fournis dans la section suivante) ;
- une augmentation des pics de crue (fig. 3.7) ;
- une baisse de la qualité des eaux de surface du fait du rejet de polluants (eaux usées, pesticides, fertilisants...) dans les cours d'eau (Moss, 2008) ;
- et une réduction des débits d'été durant les périodes sèches (du fait d'une diminution de la recharge des eaux souterraines) (Ogden *et al.*, 2013).

Cependant, malgré une littérature fournie, la manière dont les changements de couverture et d'usage du sol affectent les processus hydrologiques peut également être plus variable (Guzha *et al.*, 2018) : en d'autres termes, ces conséquences, bien que courantes, ne seront pas systématiquement valables dans tous les contextes.

Par exemple, la conversion de superficies forestières en autres catégories de couverture des sols (prairies, cultures, zones urbaines...) conduit à une réduction à la fois de la surface foliaire et de la profondeur racinaire, ce qui réduit ainsi les capacités d'évapotranspiration. En parallèle, du fait d'une abondance de matière organique au sein de ses strates supérieures, les sols forestiers sont généralement caractérisés par de fortes capacités d'infiltration. Dans ces conditions, les changements de type « déforestation », en particulier dans les zones présentant du relief, sont souvent associés à une augmentation du ruissellement de surface (et donc du risque d'inondation et

d'érosion des sols) (Guzha *et al.*, 2015). La déforestation conduit ainsi généralement à une augmentation significative du débit annuel moyen des cours d'eau (Brown *et al.*, 2005) — parfois couplée à une baisse des débits en période d'étiage, du fait d'une recharge plus faible des eaux souterraines. À l'opposé, les changements de type « reforestation » sont généralement présentés comme ayant la réponse hydrologique contraire (Farley *et al.*, 2005). Cependant, des observations suggèrent que, dans certains contextes, les propriétés d'infiltration des sols peuvent être parfois maintenues (Eisenbies *et al.*, 2007). Ainsi, le degré de perturbation du sol, et en particulier la mise en œuvre de mesures de conservation des sols, pourraient aussi déterminer une partie de la réponse hydrologique face au changement (Liu *et al.*, 2015).

**Figure 3.7.** Représentation simplifiée de l'effet de l'urbanisation sur les crues : plus les sols sont urbanisés (et donc imperméabilisés), plus le ruissellement augmente, générant des pics de crue plus précoces et plus intenses.



Source : © Water Family, adapté de Federal Interagency Stream Restoration Working Group (1998).

## ■ Les drainages

Les systèmes de drainage sont conçus pour évacuer artificiellement l'excès d'eau des sols, généralement pour rendre les terres plus propices à l'agriculture ou au développement urbain (Sloan *et al.*, 2017). Ces systèmes peuvent prendre diverses formes (telles que des fossés, des drains souterrains et des canaux) visant toutes à accélérer les flux d'eau hors des sols (Holden *et al.*, 2006). L'un des principaux impacts hydrologiques des drainages est ainsi la réduction de la capacité de rétention d'eau des sols, ce qui atténue significativement l'effet « éponge » fourni par ce stock naturel, tout en limitant la recharge des nappes souterraines (Haapalehto *et al.*, 2014). Or ces deux éléments sont particulièrement importants pour permettre de tamponner les événements extrêmes (pluies intenses ou sécheresses). En conséquence, pendant les périodes de fortes précipitations, les systèmes de drainage peuvent accélérer le ruissellement de

l'eau (Blann *et al.*, 2009), augmentant ainsi le risque d'inondation en aval (Holden *et al.*, 2006). À l'inverse, en période de sécheresse, les zones drainées peuvent manquer d'humidité suffisante (faute de soutien apporté par ces zones « éponges »), et donc entraîner une raréfaction de l'eau douce disponible à l'échelle du bassin versant.

Outre leurs impacts sur les activités humaines en aval, les drainages peuvent altérer les écosystèmes des zones humides et des tourbières, qui dépendent de conditions hydrologiques spécifiques. La dégradation de ces habitats peut ensuite entraîner une perte de biodiversité, car de nombreuses espèces végétales et animales sont adaptées aux conditions humides et ne peuvent pas survivre dans des environnements plus secs. Enfin, bien que cette thématique ne soit pas développée plus en détail dans cet ouvrage, il semble important de mentionner que la qualité de l'eau est également impactée par les drainages (Skaggs *et al.*, 1994). En effet, en augmentant la vitesse à laquelle l'eau s'écoule, les drainages peuvent accélérer le transfert d'éléments (nutriments, polluants...) vers les eaux de surface. Cela peut ensuite fortement affecter la qualité de l'eau en aval — par exemple à travers des problèmes tels que l'eutrophisation (où une surabondance de nutriments dans l'eau provoque une prolifération d'algues) —, impactant à la fois les activités humaines et la biodiversité.

## ■ L'arasement de haies

Les haies (parfois couplées à des talus) ont longtemps été utilisées en agriculture. Elles constituent notamment un des attributs principaux du bocage (paysage morcelé de petites et moyennes parcelles de prairies, cultures et bois), permettant de séparer les différentes parcelles. Résultant intégralement de pratiques agricoles, ce type de paysage (contrairement à une majorité d'impacts anthropiques discutés au sein de cet ouvrage) présente pourtant un certain nombre de bénéfices vis-à-vis de la ressource en eau. Tout d'abord, la présence de haies et talus peut permettre de rediriger une partie des écoulements de surface et de favoriser l'infiltration de l'eau. De plus, cette infiltration de l'eau est favorisée par la présence de sols plus perméables au voisinage des haies (grâce à une concentration plus importante de matière organique et de systèmes racinaires). En conséquence, bien qu'étant le produit d'activités humaines, ce type de paysage agricole peut permettre d'allonger le temps de transfert de l'eau à l'échelle des bassins versants, ce qui accroît la recharge des eaux souterraines et réduit les pics de crues en aval (Ghazavi *et al.*, 2008). De façon complémentaire, ce ralentissement des écoulements peut également permettre de mieux filtrer les polluants et limiter l'érosion des sols (atténuant dans le même temps les phénomènes de coulées de boue). Il convient néanmoins de légèrement nuancer ces bénéfices qui peuvent être relativement variables — ces infrastructures bocagères étant surtout efficaces lorsque les haies et talus sont continus et positionnés perpendiculairement au sens des écoulements (Reulier *et al.*, 2015).

En revanche, les actions continues de suppression des haies et talus conduites depuis la seconde moitié du xx<sup>e</sup> siècle ont généralement conduit à faire disparaître les avantages

(lorsqu'ils étaient présents) que ces infrastructures bocagères pouvaient apporter. Combinées aux autres conséquences du remembrement agricole (augmentation de la taille des parcelles, drainages, aménagement des cours d'eau... ; Roche, 1951), ces évolutions ont ainsi eu pour conséquence de réduire le temps de transfert de l'eau — conduisant à une augmentation du ruissellement de surface et une accentuation des risques d'inondation (Bronstert *et al.*, 1995) et des coulées de boue à l'échelle des bassins versants.

## ■ Le travail du sol

Dans de nombreuses situations, les pratiques agricoles peuvent imposer des changements importants dans les propriétés du sol (Bertolino *et al.*, 2010), conduisant à une diminution générale de leurs qualités physiques et modifiant significativement leur équilibre hydrique (Scanlon *et al.*, 2007). Le travail du sol (le labour en particulier) — dont l'objectif est de créer les conditions propices à la culture — est un assez bon exemple. Fondamentalement, il s'est développé en agriculture pour un certain nombre de bonnes raisons : fournir une structure de sol appropriée pour l'établissement des plantes ; contrôler l'humidité, l'aération et la température du sol ; désherber (et limiter la présence d'adventices, également appelées « mauvaises herbes ») ; et mélanger la matière organique (incorporer le fumier dans le sol notamment) (Asmamaw, 2017). Cependant, après des siècles d'utilisation (et l'émergence de techniques permettant d'aller de plus en plus profond), le labour s'avère responsable d'une importante dégradation des sols à l'échelle mondiale, notamment du fait de leur érosion (Li *et al.*, 2007 ; Van Oost *et al.*, 2006 ; Vanwalleghem *et al.*, 2010). En effet, bien qu'il s'agisse d'un phénomène initialement naturel affectant toutes les terres émergées de la planète, l'érosion des sols (c'est-à-dire l'extraction et le transport de particules de sol par des forces érosives telles que l'eau) a été significativement accentuée par la mise en place de pratiques agricoles non durables (Montgomery, 2007). Ce phénomène se manifeste principalement par une perte accélérée de la couche arable (couche supérieure du sol) — affectant ainsi la fertilité des sols — et le transport d'éléments nutritifs et de polluants en excès — pouvant entraîner une dégradation de la qualité des masses d'eau (Montanarella *et al.*, 2016).

En plus de cela, le labour est généralement responsable d'un compactage important des sols (Boizard *et al.*, 2002) pouvant provenir d'une variété de causes (Hamza et Anderson, 2005) — telles que l'utilisation d'engins agricoles lourds (Botta *et al.*, 2008) ou encore sous l'effet de la charrue elle-même (Manichon, 2022). Modifiant la taille des pores et la connectivité du sol (Horn, 2003), ce compactage entraîne une diminution de l'infiltration (Vervoort *et al.*, 2001) et de la capacité de stockage de l'eau des sols (Schäffer *et al.*, 2007). En outre, le compactage peut affecter l'absorption et les pertes d'éléments nutritifs dans les systèmes agricoles (Lipiec et Stępniewski, 1995). En général, cela contribue ainsi à une augmentation du ruissellement de surface (Adekalu *et al.*, 2006) et de l'érosion (Schilling *et al.*, 2008). Lors de fortes précipitations, la

combinaison de ces deux effets (forte érosion des sols et ruissellement important) génère par ailleurs des problématiques de coulées de boue (Wicherek, 2001).

L'objectif du travail du sol est d'améliorer la structure sur les premiers centimètres, afin d'aérer et décompacter au maximum le sol. Néanmoins, ce sol meuble (exposé à l'air libre) se retrouve affecté par la pluie qui, à travers son action mécanique (impact des gouttes d'eau), peut venir recomacter le sol en surface et créer une couche dense et peu perméable (appelée « croûte de battance ») (Boiffin, 1984). Plus en profondeur, une autre couche peu perméable peut également se former sous la zone de passage de la charrue, créant ce qui est appelé une « semelle de labour » (Bowden et Jarvis, 1985) — c'est-à-dire une couche relativement compacte de sol située juste à la base du labour. Au final, cette semelle de labour limite l'infiltration de l'eau plus en profondeur et favorise l'érosion de la couche de sol au-dessus d'elle (l'eau ruisselle depuis la surface en suivant cette semelle de labour, emportant une partie des particules de sol).

Enfin, à cause de la perte de matière organique et du stress qu'il génère, le labour peut également dégrader significativement la biodiversité des organismes du sol indispensables à sa qualité et son aération (Ponge, 2000). Notamment, l'action mécanique du labour — consistant à retourner le sol, c'est-à-dire à enfouir en profondeur les parties normalement présentes en surface — peut favoriser la formation de conditions anaérobiques (sans oxygène) susceptibles de nuire aux organismes ayant besoin d'oxygène (les champignons du sol, par exemple). Le labour affecte de la sorte la plupart des organismes du sol sur le plan de l'abondance et de la diversité (Kladivko, 2001), bien que cet impact puisse être variable en fonction des espèces et de l'intensité du labour (Chan, 2001). Quoiqu'il en soit, ces conséquences biologiques sur les sols se traduisent également par une diminution des capacités d'infiltration au profit du ruissellement et de l'érosion.

Ainsi, de manière générale, le labour a entraîné une augmentation à long terme de la densité du sol, bien que chaque cycle de labourage réduise temporairement la compaction du sol et élimine la croûte du sol pour induire des taux d'infiltration plus élevés (sur les premiers centimètres) (Rodrigo Comino *et al.*, 2016). Il est néanmoins nécessaire de souligner que, malgré tous ces constats, l'effet du labour sur les propriétés hydrauliques du sol ne semble pas toujours constant. Notamment, en comparant sols labourés et non labourés (une pratique appelée « agriculture de conservation des sols ») (Lipiec *et al.*, 2006), des observations contrastées sont rapportées dans la littérature scientifique concernant les capacités d'infiltration des sols (Strudley *et al.*, 2008). Ces résultats contradictoires traduisent ainsi que le travail du sol n'est pas l'unique facteur entrant en jeu, mais doit également dépendre du contexte local, comme les conditions pédoclimatiques (un labour pouvant être mieux adapté à un type de sol qu'un autre). Enfin, l'impact du travail du sol nécessite également d'être mis en parallèle avec d'autres pratiques agricoles, telles que l'usage d'intrants chimiques de synthèse (produits phytosanitaires et engrais), les choix culturaux (comme les rotations)...

## ■ L'usage de produits phytosanitaires et d'engrais de synthèse

L'agriculture fait généralement usage d'une quantité conséquente de pesticides (afin de protéger les cultures), ainsi que d'engrais (afin d'augmenter le rendement des cultures). Cependant, malgré leurs avantages certains vis-à-vis de la productivité agricole, ces produits ont également des effets négatifs sur la santé des sols, en affectant significativement leur biodiversité (Beaumelle *et al.*, 2023) — entraînant ainsi un compactage progressif qui réduit l'infiltration et la capacité de stockage de l'eau (Keesstra *et al.*, 2021). Certains chercheurs ont par ailleurs mis en évidence que l'utilisation d'herbicides (à travers la destruction du couvert végétal qu'elle entraîne) rendait aussi les terres agricoles très vulnérables à l'érosion (Keesstra *et al.*, 2016) — et donc au ruissellement (l'eau étant une des principales forces érosives). L'utilisation de produits phytosanitaires et le travail du sol peuvent ainsi, à des degrés variés, générer des conséquences relativement similaires vis-à-vis des propriétés hydrauliques du sol (Cerdà *et al.*, 2018) — accentuant dans les deux cas le ruissellement tout comme la dégradation du sol avec des taux d'érosion plus élevés (Cerdà *et al.*, 2017). Ainsi, les résultats contradictoires rapportés en comparant diverses pratiques de labour pourraient en partie s'expliquer par le fait que les pratiques de « non-labour » font généralement appel à l'utilisation d'herbicides afin de désheer avant de semer.

Enfin, l'usage intensif de ces intrants chimiques de synthèse est également responsable d'une dégradation importante de la qualité des eaux superficielles et souterraines, accentuant encore plus la raréfaction de l'eau douce disponible dans de nombreux territoires. En effet, outre le ruissellement plus important associé à une infiltration plus faible, l'eau se retrouve souvent contaminée par les produits pulvérisés sur la surface et la végétation, ainsi que par des sédiments issus de l'érosion (García-Díaz *et al.*, 2017). Même si certains de ces produits sont absorbés par le sol, une grande partie est transportée dans les eaux de ruissellement, pouvant ainsi nuire à la qualité des masses d'eau en aval.

## ■ Les choix cultureux

Le choix de culture (prairie, maïs, blé, colza, tournesol...) est un autre facteur pouvant affecter l'hydrologie des territoires : en plus d'impacter directement le cycle de l'eau à travers les différents besoins en eau des plantes (et surtout leur période de croissance), il peut également affecter le type et la période de labour. Par exemple, certaines cultures du maïs, semées au printemps, peuvent laisser les sols nus durant la période hivernale (comparées à certaines cultures de blé, par exemple), alors même que c'est à cette saison que les précipitations sont généralement les plus importantes, accentuant de fait l'érosion des sols, les coulées de boues et limitant la recharge des nappes souterraines. C'est d'ailleurs pour cette raison qu'en France l'attribution d'aides issues de la Politique agricole commune européenne



(PAC 2023-2027) peut être assujettie à la mise en place d'une couverture hivernale des sols. Ainsi, l'impact des pratiques agricoles dépend non seulement de la charge appliquée (degré de compactage du sol), mais aussi de paramètres tels que le type de culture, les caractéristiques du sol et sa teneur en eau, ou encore la localisation de la parcelle dans le paysage.

## ■ Une généralisation pas toujours possible

Bien que les impacts négatifs présentés précédemment soient bien réels et documentés, ils peuvent ne pas toujours correspondre à la situation de tous les territoires — cet ouvrage visant à offrir une vision d'ensemble, certains raccourcis (notamment agronomiques) peuvent ainsi être identifiés. Aussi, malgré tout ce qui est documenté dans la littérature scientifique, les conséquences hydrologiques de l'ensemble des changements de couverture et d'usage des sols ne peuvent pas être totalement généralisées, car elles dépendent d'un ensemble varié de cofacteurs, incluant :

- le degré de modification de la zone naturelle initiale (par exemple en fonction de la méthode de déforestation) (Beschta, 1998) ;
- l'intensité du changement (par exemple la superficie impactée ou le type de pratiques mis en place) (Bosch et Hewlett, 1982) ;
- le type de végétation repoussant (Swank *et al.*, 1988) ;
- les conditions climatiques locales, tout particulièrement la distribution et l'amplitude des précipitations (Whitehead et Robinson, 1993) ;
- et les caractéristiques hydrogéologiques et les propriétés physiques du bassin versant (Bi *et al.*, 2014), comme le type de sol et d'aquifère (profondeur, porosité, perméabilité), ou encore la topographie.

## ■ Le lien entre climat et changement de couverture et d'usage des sols

Un autre aspect important de l'impact des changements de couverture et d'usage des sols repose sur le lien étroit existant entre végétation, cycle de l'eau et climat. En effet, ces changements ont une influence majeure sur les flux biophysiques à la surface de la Terre (les cycles de la vapeur d'eau dans l'atmosphère notamment) et, en conséquence, peuvent également impacter le climat à différentes échelles spatiales et temporelles (Pielke *et al.*, 2002 ; Mahmood *et al.*, 2014 ; Salazar *et al.*, 2016). Tout d'abord, ces changements peuvent modifier la hauteur et la densité de la végétation ainsi que l'albédo de la surface terrestre (c'est-à-dire la fraction de rayonnement solaire réflétée) — influençant de fait les processus d'évapotranspiration et le partitionnement des flux de chaleur au niveau du sol (Foley *et al.*, 2003). Ces modifications peuvent ensuite significativement influencer les patrons de température et de précipitation (Pielke *et al.*, 2007). Par exemple, des changements de type « déforestation » peuvent fortement affecter le climat à l'échelle régionale

(Debortoli *et al.*, 2017) (jusqu'à plusieurs milliers de kilomètres dans le sens du vent ; Creed *et al.*, 2019), jusqu'à réduire de 30 % des précipitations dans certaines régions (Lawrence et Vandekar, 2015 ; Spracklen et Garcia-Carreras, 2015).

De la même manière, l'agriculture peut significativement augmenter l'humidité du sol du fait de pratiques intensives d'irrigation (McDermid *et al.*, 2023), ce qui peut affecter considérablement l'évapotranspiration et ainsi modifier le climat régionallement (l'eau, une fois sous forme de vapeur, suivant le sens du vent) (Ozdogan *et al.*, 2010). Par exemple, certaines études ont mis en évidence que, depuis le siècle dernier, l'augmentation de l'irrigation (à partir d'eau souterraine) dans la région des grandes plaines des États-Unis avait été responsable d'une augmentation de 15 à 30 % des précipitations estivales dans des zones situées à plusieurs milliers de kilomètres dans le sens du vent (De Angelis *et al.*, 2010). Du fait d'une modification de ces patrons de précipitations estivales, de telles pratiques d'irrigation intensive pourraient ainsi conduire à une augmentation des débits de cours d'eau situés sur d'autres bassins versants (Puma et Cook, 2010 ; Kustu *et al.*, 2011) : par exemple, l'irrigation intensive en Inde aurait été responsable d'une augmentation des débits du fleuve Yangtsé en Chine (Wang-Erlandsson *et al.*, 2018).

## L'aménagement des cours d'eau

En France métropolitaine, un grand nombre de cours d'eau ont subi des aménagements ayant eu des conséquences globalement positives pour la société : augmentation des stocks d'eau disponibles, prévention des inondations, source d'énergie, transport fluvial, etc. (Hogeboom *et al.*, 2018). Cependant, ces aménagements, qu'ils soient de petite ou de grande taille, ont également eu des impacts négatifs à l'échelle des bassins versants (Dong *et al.*, 2019b) — leurs effets mettant parfois plusieurs décennies à se faire sentir.

Les grands systèmes fluviaux sont extrêmement complexes, présentant une variabilité naturelle à l'échelle spatiale et temporelle. Au fil du temps, les cours d'eau réagissent aux facteurs de stress naturels — principalement le climat — et adaptent leurs géométries (taille et forme des chenaux) en fonction des contraintes géologiques locales (Alexander *et al.*, 2012). Par exemple, un cours d'eau s'écoulant dans un canyon rocheux dispose d'une capacité limitée à ajuster sa position horizontale (sur de courtes périodes) comparé à un cours d'eau s'écoulant dans une large vallée alluviale (dont le tracé peut, en condition naturelle, évoluer chaque année). Ainsi, les grands cours d'eau traversent généralement une variété de paysages — avec des changements géologiques, climatiques et biologiques — influençant directement la géométrie et l'hydraulique de leurs lits mineurs et majeurs.

Les nombreux aménagements des cours d'eau se sont superposés à cette complexité naturelle, souvent en parallèle d'une multitude d'autres activités d'ingénierie

(Williams et Wolman, 1984) (voir plus haut, la section « Les changements de couverture et d'usage des sols »).

## ■ Les barrages et seuils

Le besoin d'approvisionnement en eau potable, d'irrigation, de prévention des inondations (régulation des débits des cours d'eau) et de production d'énergie (par exemple pour l'hydroélectricité ou l'utilisation des moulins) a conduit à la construction de nombreux ouvrages faisant obstacle à l'écoulement (Villablanca *et al.*, 2022) — dont les barrages et seuils constituent les principaux retrouvés à l'échelle nationale. Malgré des similarités, ces deux types d'ouvrages présentent néanmoins quelques différences. Tout d'abord, les seuils désignent les ouvrages fixes ou mobiles (généralement de petite taille) construits directement dans le lit *mineur* des cours d'eau (c'est-à-dire l'espace où les écoulements s'effectuent la majeure partie du temps) (Viollet *et al.*, 2003). Les barrages, de leur côté, sont des ouvrages plus hauts que les seuils, construits dans le lit *majeur* des cours d'eau (c'est-à-dire comprenant à la fois le lit mineur et l'ensemble des zones inondables situées de part et d'autre), barrant parfois même des vallées entières. De manière simplifiée, les seuils désignent ainsi des petits barrages déversants utilisés historiquement afin de relever le niveau des rivières, pour permettre la régulation des crues ou l'alimentation de moulins.

Outre les impacts sur le cycle de l'eau à l'échelle du bassin versant liés à la création de retenues (voir section « La création de stockages artificiels »), ces ouvrages modifient significativement les régimes hydrologiques (Magilligan et Nislow, 2001) et sédimentaires (Yang *et al.*, 2011 ; Kondolf *et al.*, 2014), entraînant des répercussions majeures sur la structure des cours d'eau (Kondolf, 1997 ; Petts et Gurnell, 2005) et le fonctionnement des écosystèmes en aval (Poff et Zimmerman, 2010). Notamment, la construction et l'exploitation de barrages génèrent des modifications des régimes d'écoulement à différentes échelles temporelles (de l'inondation à l'échelle inter-annuelle) (Batalla *et al.*, 2004), ce qui se traduit, à son tour, par des effets en cascade sur les processus d'érosion, de transport et de dépôt des sédiments (Brandt, 2000 ; Lobera *et al.*, 2016), et sur la morphologie et l'habitat des systèmes fluviaux (Ligon *et al.*, 1995). Bien sûr, la nature et l'ampleur de ces effets peuvent légèrement varier suivant la taille relative et le fonctionnement de chaque ouvrage. Par exemple, les effets peuvent être différents selon que le barrage présente un régime d'écluse (consistant à lâcher subitement les eaux retenues) (Batalla *et al.*, 2021 ; Vanzo *et al.*, 2023) ou un régime de relargage relativement constant de l'eau. De même, des différences peuvent être observées entre les barrages de grandes tailles et les ouvrages de type « seuils », bien que leurs effets cumulés (du fait de leur nombre) ne doivent pas être sous-estimés pour autant.

Néanmoins, quels que soient les capacités relatives et le mode de gestion des ouvrages, l'une des préoccupations majeures concerne la fragmentation spatiale qu'ils imposent au cours d'eau (Farah-Pérez *et al.*, 2020). Ainsi, à l'heure actuelle,

plus de la moitié des grands systèmes fluviaux du monde sont fragmentés en raison d'obstacles à l'écoulement de ce type (Nilsson *et al.*, 2005). En France métropolitaine, ce sont près de 103 000 de ces ouvrages qui étaient recensés en 2023<sup>43</sup>, ce qui, rapporté aux 430 000 km de cours d'eau parcourant le pays, permet de dénombrer en moyenne environ un obstacle tous les 4,16 km de cours d'eau. Cette proportion cache cependant de fortes disparités à l'échelle nationale : les obstacles sont plus présents dans les bassins versants du Centre et de l'Est que dans ceux du Sud et de l'Ouest du pays<sup>44</sup>.

Quoi qu'il en soit, l'effet de la fragmentation des cours d'eau se répercute à plusieurs niveaux. Tout d'abord, les barrages et seuils modifient l'acheminement des sédiments vers l'aval (Vericat *et al.*, 2006 ; Gabbud et Lane, 2016) — étant donné qu'un pourcentage élevé de matériaux est retenu dans les réservoirs (Brignoli *et al.*, 2017 ; Béjar *et al.*, 2018) — générant un déséquilibre sédimentaire dans les chenaux fluviaux. Ensuite, la présence de ces ouvrages entraîne généralement une réduction de l'ampleur et de la fréquence des inondations (FitzHugh et Vogel, 2011 ; Petts et Gurnell, 2005) qui, à son tour, a également un impact sur la dynamique sédimentaire et les conditions géomorphologiques (Chong *et al.*, 2021). Cette modification des régimes d'écoulement affecte aussi le bilan énergétique global du système (Graf, 2006) et conduit généralement à une diminution des débits annuels (Piqué *et al.*, 2016). Mais surtout, les barrages et les seuils sont responsables d'une dégradation des écosystèmes aquatiques et de la fragmentation de leurs populations (Poff et Zimmerman, 2010), avec des pertes de productivité, des aires de distribution réduites et des changements dans la composition des communautés de poissons (Santucci *et al.*, 2005 ; Catalano *et al.*, 2007) et d'invertébrés aquatiques (Cortes *et al.*, 1998 ; Concepcion et Nelson, 1999 ; Blakely *et al.*, 2006).

Ces répercussions écologiques s'expliquent, tout d'abord, du fait que la présence d'obstacles à l'écoulement (et la fragmentation qu'ils entraînent) affecte significativement la continuité écologique, c'est-à-dire la capacité des espèces à se déplacer au sein des écosystèmes — les poissons migrateurs, en particulier, accédant difficilement ou pas du tout à leurs habitats de reproduction ou de croissance. De plus, la modification du transport sédimentaire altère les habitats aquatiques, en les rendant uniformes et pauvres en substrats<sup>45</sup>. Le ralentissement des écoulements, de même que la réduction (ou disparition) de variabilité naturelle des débits saisonniers et mensuels modifient également les habitats qui, de milieux courants, deviennent lenticques (c'est-à-dire d'eaux calmes à renouvellement lent), imposant des ajustements écologiques vers des espèces plus adaptées à ce type de milieu (Ligon *et al.*, 1995). Ces changements sont particulièrement marqués dans les systèmes fluviaux où les tendances saisonnières sont très fortes et où les écosystèmes sont adaptés à des

43. <https://chiffrecle.oieau.fr/2555> (consulté le 18/08/2025).

44. *Ibid.* (consulté le 30/06/2024).

45. <https://www.ofb.gouv.fr/la-continuite-ecologique-des-cours-deau> (consulté le 18/08/2025).

fluctuations hydrologiques très importantes — dans les régions méditerranéennes notamment (Kondolf et Batalla, 2005).

Pour finir, la présence d'obstacles à l'écoulement se traduit par des impacts sur la qualité de l'eau, du fait d'un ralentissement du courant au bénéfice de zones stagnantes, entraînant un réchauffement (Lessard et Hayes, 2003) et une perte d'oxygénation de l'eau. De plus, ces changements thermiques, couplés à des changements dans la dynamique de transport des nutriments dans les cours d'eau, peuvent conduire à des phénomènes d'eutrophisation (développement d'algues) entraînant l'asphyxie des espèces aquatiques.

## ■ Les digues et canaux

Les digues et les canaux sont des structures hydrauliques couramment utilisées pour gérer les ressources en eau (Peter, 1982). Bien que regroupés ici au sein d'une même catégorie, ces ouvrages présentent néanmoins des différences sur le plan des fonctions et des caractéristiques<sup>46</sup>. Les digues, tout d'abord, sont principalement conçues pour protéger les terres contre les inondations. Généralement construites en terre, en béton ou en matériaux composites, elles forment des barrières qui retiennent ou dirigent l'eau pour prévenir les dommages aux zones résidentielles, agricoles et industrielles. Elles peuvent également servir à créer des réservoirs pour l'approvisionnement en eau et l'irrigation. Situées le long des cours d'eau, des côtes ou autour des réservoirs d'eau, elles sont souvent linéaires et suivent le contour des zones à protéger. Les canaux, de leur côté, sont destinés à transporter l'eau d'un endroit à un autre pour divers usages tels que l'irrigation, l'approvisionnement en eau potable, la navigation (en lieu et place d'un cours d'eau difficilement navigable ou pour pallier une absence de cours d'eau) et la production d'énergie hydroélectrique. Ils peuvent également servir à drainer les zones marécageuses et à gérer les eaux pluviales. Formant des conduits artificiels, les canaux sont souvent revêtus de béton ou d'autres matériaux (par exemple des digues de canal) pour minimiser les pertes d'eau par infiltration.

Malgré leurs bénéfices pour les sociétés (navigation, irrigation, prévention des inondations...), les digues et canaux génèrent des effets significatifs et variés à l'échelle des bassins versants (Gurnell *et al.*, 2009). Tout d'abord, ces ouvrages sont responsables de modifications des dynamiques hydrologiques, affectant notamment la distribution naturellement saisonnière de l'eau et les régimes d'inondation et de sécheresse (Harvey *et al.*, 2011). Par exemple, ils réduisent significativement le rôle tampon des plaines inondables — pourtant indispensables à l'équilibre hydrologique des bassins versants (Tockner *et al.*, 2010). De plus, en limitant nettement les débits de débordement lors des crues, ils sont généralement responsables d'un dépôt plus important

46. <https://www.ecologie.gouv.fr/ouvrages-hydrauliques-barrages-et-digues> (consulté le 18/08/2025).

de sédiments et de matières organiques dans les plaines inondables, ayant pour effet d'élever leur niveau et de les assécher (Hohensinner *et al.*, 2004).

Ensuite, les digues et canaux impactent fortement la dynamique morphologique des cours d'eau — par exemple lorsqu'un tronçon de rivière sinueux (c'est-à-dire avec méandres) ou en tresse (c'est-à-dire présentant de nombreux chenaux formant des divisions ou connexions entre ces bras) (Wiederkehr *et al.*, 2008) est transformé en un chenal droit et uniforme (voir plus loin, fig. 3.8). En France, du fait de ces aménagements, la longueur totale des tronçons de rivières formant ce type de profil en tresse aurait ainsi diminué de 70 % (Schmutz et Sendzimir, 2018) — ne se retrouvant actuellement plus que sur des tronçons de certaines rivières (par exemple de la Loire, de l'Allier, de la Durance, de la Drôme ou du Var). Le fait de concentrer les écoulements dans des chenaux plus étroits (afin de gagner des espaces agricoles ou urbains) augmente significativement la vitesse d'écoulement de l'eau et la capacité de transport des sédiments (réduisant de fait leur dépôt), ce qui se traduit souvent par une incision (érosion) du lit des rivières (Schmutz et Sendzimir, 2018). En plus du processus d'endiguement et de canalisation, la principale cause d'amplification de la dégradation du lit est liée à la rectification du chenal. Néanmoins, cet aspect sera discuté plus en détail dans la section suivante, « Le recalibrage et la rectification des cours d'eau ».

Ces modifications des dynamiques hydromorphologiques se traduisent, à leur tour, par une réduction de la complexité et de la diversité des habitats aquatiques au profit de rivières de plus en plus uniformes (Lau *et al.*, 2006). Ces changements affectent ensuite significativement la biodiversité, avec des impacts notables sur les communautés de poissons et d'invertébrés aquatiques (Maaß *et al.*, 2021), de même que sur les communautés terrestres. Enfin, la multiplication de canaux peut également être responsable de pertes nettes pour certains bassins versants, l'eau étant transportée ailleurs. Ces pertes sont en plus aggravées du fait d'une augmentation de l'évaporation (estimée entre 3 mm/j et 5 mm/j en période estivale en France) (Schmitt, 2013 ; Malaterre *et al.*, 2013), réduisant de fait encore plus la disponibilité de l'eau à l'échelle du bassin versant. Néanmoins, cette perte par évaporation est bien plus faible que dans le cas des stockages artificiels : en prenant l'hypothèse basse d'un niveau d'évaporation de 3 mm/j pendant les 90 jours les plus chauds de l'année, l'impact des canaux (c'est-à-dire s'ajoutant à l'évaporation qu'aurait subie l'eau dans sa rivière d'origine) a récemment été estimé à 0,3 % à l'échelle nationale (Arambourrou *et al.*, 2024).

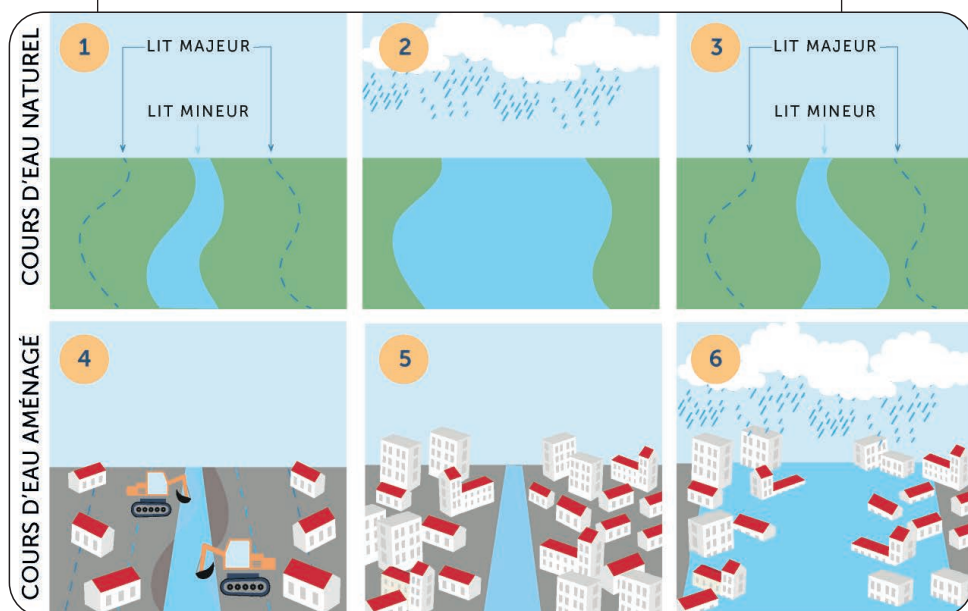
## ■ Le recalibrage et la rectification des cours d'eau

Utilisés depuis longtemps, le recalibrage et la rectification sont deux opérations d'ingénierie visant à transformer le tracé naturel des cours d'eau en formes simples (chenaux plus droits et uniformes) (Wolf *et al.*, 2021). Les opérations de recalibrage visent à modifier la forme du lit des cours d'eau (élargissement, creusement, etc.)

(Schmutz et Sendzimir, 2018), tandis que les opérations de rectification visent à artificiellement linéariser le tracé naturellement sinueux (avec méandre) de certains cours d'eau (fig. 3.8). S'inscrivant au sein d'un processus général de canalisation de l'eau pour mieux la contrôler (modification du tracé de la rivière, ajustement des débits, stabilisation des berges...), ces opérations visent à répondre à divers enjeux, tels que la prévention des inondations, le gain d'espaces agricoles et urbains, ou encore la réduction de l'érosion des berges (Florsheim *et al.*, 2011 ; Anim *et al.*, 2018). Pouvant être mises en place préalablement à la création de digues et canaux, elles peuvent également intervenir de manière indépendante, dans le simple but d'amplifier la capacité d'écoulement du chenal (Brookes, 1988).

Cependant, le recalibrage et la rectification sont aussi identifiés comme les principales causes (couplées aux autres aménagements discutés précédemment) de la modification des dynamiques hydrologiques et morphologiques des cours d'eau (Stefanidis *et al.*, 2020). En particulier, la rectification est la cause majeure d'amplification de la dégradation du lit des cours d'eau (processus d'autant plus aggravé si

**Figure 3.8.** Représentation simplifiée des différences de réponse hydrologique entre un cours d'eau naturel et un cours d'eau ayant subi divers aménagements (rectification, recalibrage, urbanisation...).



Source : © Water Family, adapté d'une figure de source inconnue.



ce même lit a également subi des opérations de recalibrage). Ainsi, dans les rivières initialement sinueuses, où le nouveau tracé est beaucoup plus court et plus abrupt, la puissance du cours d'eau augmente considérablement et le lit de la rivière peut s'inciser de plusieurs mètres en l'espace d'un an ou de plusieurs années (Kesel, 2003 ; Knighton, 2014). Ces conséquences peuvent d'ailleurs s'étendre bien au-delà des tronçons de rivière rectifiés — le processus d'incision du lit empiétant généralement progressivement vers l'amont et finissant par affecter de grandes parties d'un système fluvial (Simon, 1989). Les matériaux mobilisés sont ensuite transportés vers l'aval aussi loin que le permet la puissance du cours d'eau, générant le dépôt d'importants volumes de sédiments juste en aval des tronçons rectifiés (Schmutz et Sendzimir, 2018).

La rectification et le recalibrage des cours d'eau ont également pour conséquence d'accélérer le temps de transfert de l'eau à l'échelle des bassins versants, réduisant par là même la capacité de l'eau à s'infiltrer pour recharger les nappes et amplifiant les risques d'inondation (puis d'étiage sévère) en aval. Ces effets peuvent par exemple être illustrés à partir de la figure 3.8. En fonctionnement naturel, le cours d'eau présente un profil sinueux avec de nombreux méandres (fig. 3.8-1). Lors d'évènements de précipitation, le cours d'eau en crue déborde dans les plaines inondables adjacentes (son lit majeur), permettant ainsi de tamponner le flux d'eau en aval et favorisant la recharge des nappes d'eau souterraines (fig. 3.8-2). Ces crues permettent également de faire évoluer le tracé naturel du cours d'eau dans le temps en créant de nouveaux méandres (fig. 3.8-3), un phénomène favorisant la biodiversité.

La réponse hydrologique est significativement modifiée si ce cours d'eau subit des opérations de rectification (fig. 3.8-4), particulièrement si ces aménagements sont combinés à des changements de couverture et d'usage des sols (urbanisation du lit majeur dans ce cas) (fig. 3.8-5). À ce moment-là, en cas de fortes précipitations, l'écoulement de l'eau est beaucoup plus rapide, générant un pic de crue bien plus rapide et important en aval, lui-même aggravé par la présence de sols imperméabilisés (fig. 3.8-6). Cette eau évacuée aussi rapidement réduit également fortement la quantité qui rechargeait les nappes souterraines lors d'évènements de crues, ce qui se traduira par une plus grande vulnérabilité aux épisodes de sécheresse.

Enfin, la complexité des chenaux étant connue pour favoriser la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes dans les systèmes fluviaux (Elosegi *et al.*, 2010), le recalibrage et la rectification des cours d'eau (à travers leurs effets sur les dynamiques hydromorphologiques) ont également des impacts significatifs sur la biodiversité. L'homogénéisation des profils de rivières conduit ainsi à une homogénéisation de ses habitats et donc, par effet domino, à une perte de la diversité des espèces. En modifiant les régimes de débit, ces opérations peuvent également affecter les cycles de vie des espèces aquatiques, altérant, par exemple, les zones de frai (c'est-à-dire de reproduction) des poissons et d'autres habitats critiques.

## Le changement climatique

Les précédentes sections ont mis en lumière que le cycle de l'eau était déjà fortement altéré par l'ensemble des pressions anthropiques sur les territoires. Dans ce contexte, le changement climatique apparaît comme une pression additionnelle venant exacerber un ensemble de problèmes déjà existants (une grosse goutte d'eau venant faire déborder un vase déjà relativement plein). Bien qu'une partie des effets du changement climatique soit d'ores et déjà perceptible, l'impact de celui-ci est donc principalement à attendre. Malgré les multiples incertitudes existantes (incertitudes sur les trajectoires socio-économiques d'émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale, sur les conséquences de ces émissions sur le climat, sur le choix des modèles numériques à disposition...) (Évin *et al.*, 2024), les simulations et observations suggèrent que le changement climatique entraînera des changements prononcés sur l'hydrologie (Sauquet *et al.*, 2025), impactant les territoires à la fois directement et indirectement.

### Les effets directs du changement climatique sur le cycle de l'eau

En France, de nombreuses études ont été conduites afin de mieux anticiper les effets du changement climatique sur les ressources en eau. À l'échelle nationale, le projet Explore2 (2021-2024), notamment, est l'un des plus récents permettant de dresser un état des lieux de la vulnérabilité à venir (Marson *et al.*, 2024)<sup>47</sup>. Un travail complémentaire de Météo-France (notamment basé sur Explore2 ; Soubeyroux *et al.*, 2024 et 2025) fournit des informations sur l'évolution du climat attendu en France selon la Trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (Tracc) — correspondant à une trajectoire à + 4 °C pour la France en 2100<sup>48</sup>. Dans ce contexte, cette section vise à proposer une synthèse des résultats de ces différents travaux.

#### L'évolution des températures

Dans la continuité des observations historiques, il apparaît que le climat évolue vers une augmentation continue des températures jusqu'à la fin du siècle (Soubeyroux *et al.*, 2024)<sup>49</sup>. Ce réchauffement, d'autant plus marqué dans la partie sud de la France, devrait survenir en toutes saisons (avec une intensité encore plus forte durant la période estivale). Dans ce contexte, une année aussi chaude que 2022 serait une année exceptionnellement fraîche à l'horizon 2100 (Soubeyroux *et al.*, 2025). Ainsi, même sans évolution des précipitations, cette augmentation des températures en

47. <https://www.inrae.fr/actualites/explore2-life-eauclimat-cles-ladaptation-gestion-leau> (consulté le 18/08/2025).

48. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/trajectoire-rechauffement-reference-ladaptation-changement-climatique-tracc> (consulté le 18/08/2025).

49. <https://www.inrae.fr/sites/default/files/projetexplore2-synthese.pdf> (consulté le 18/08/2025).

toutes saisons accentuera nécessairement les flux d'évapotranspiration, réduisant donc quoi qu'il arrive les précipitations efficaces — c'est-à-dire l'eau disponible dans les territoires. De plus, cette augmentation des températures réduira considérablement le stockage transitoire des précipitations sous forme de manteau neigeux. Pour finir, il est attendu une augmentation des extrêmes de température (nombre de jours de très forte chaleur et température des journées les plus chaudes) (Soubeyroux *et al.*, 2025). Ainsi, à l'échelle nationale, le nombre annuel de jours de très forte chaleur (température maximale dépassant 35 °C) pourrait être multiplié par dix en comparaison avec la période de référence (1976-2005) : il pourrait s'étaler de mi-mai à fin septembre et durer jusqu'à deux mois en continu. Également, dès 2050, des températures supérieures à 40 °C (extrêmement rares au xx<sup>e</sup> siècle) pourraient se produire tous les ans et des records de chaleur pourraient atteindre localement jusqu'à 50 °C.

### L'évolution des précipitations

Le changement climatique se traduit par ailleurs par une altération des régimes de précipitation (quantité, forme et patron saisonnier) (Soubeyroux *et al.*, 2024), conduisant à une augmentation de l'occurrence et de l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes (des sécheresses plus longues et plus fréquentes entrecoupées d'évènements pluvieux plus intenses) (IPCC, 2021). Il convient néanmoins de mentionner que, comparativement à l'évolution des températures, cette évolution des précipitations reste sujette à plus d'incertitudes, en particulier concernant la partie nord de la France. En revanche, les projections semblent converger sur une baisse marquée des précipitations sur la partie sud (en particulier autour de la Méditerranée) (Jacob *et al.*, 2014). Il a également été rapporté que la pluviométrie pourrait présenter une variabilité plus marquée entre hiver et été : une hausse probable des précipitations durant la période hivernale (principalement dans la partie nord, mais également légèrement dans la partie sud) couplée à une forte baisse durant la période estivale (sur tous les territoires, mais encore plus dans la partie sud)<sup>50</sup>. Cette variabilité pourrait aussi être marquée d'une année à l'autre, c'est-à-dire qu'il pourrait y avoir des alternances d'années très sèches et d'années très humides (à l'image de la situation vécue en 2022, puis en 2024). En d'autres termes, les hivers humides (avec des cumuls qui dépassent largement les records actuels) et les étés secs (avec des déficits beaucoup plus importants que ceux observés jusqu'à présent) pourraient dominer, mais certains étés humides et hivers secs pourront toujours exister.

### L'évolution de la recharge des eaux souterraines

La distribution, la période et la quantité de précipitations, ainsi que les taux d'évapotranspiration et les caractéristiques de fonte des neiges, sont des facteurs influençant directement la recharge des eaux souterraines (Sandström, 1995). Ainsi, il est attendu

50. <https://www.inrae.fr/actualites/explore2-life-eauclimat-cles-ladaptation-gestion-leau> (consulté le 18/08/2025).

que le changement climatique affecte fortement les eaux souterraines à travers des altérations dans la période et l'amplitude de la recharge (Liu, 2011 ; Kløve *et al.*, 2014) — un processus qui impacterait directement les niveaux de nappes à l'échelle annuelle et saisonnière (Venencio et García, 2011 ; Ng *et al.*, 2010). Cependant, les variations de recharge des eaux souterraines seront vraisemblablement différentes en fonction des régions. Par exemple, les projections suggèrent une diminution générale de la recharge dans le sud de l'Europe (accentuant encore plus le déficit hydrique de ces régions), tandis que le nord de l'Europe pourrait voir une augmentation de la recharge hivernale (Hiscock *et al.*, 2012). Si l'on se base sur les résultats du projet Explore2, ce contraste semble également correspondre à la possible situation de la France d'ici la fin du siècle — une augmentation de la recharge dans la partie nord et est du pays et une diminution dans la partie sud. L'impact de cette altération de la recharge sur les niveaux de nappes sera néanmoins assez variable suivant les contextes hydro-géologiques (c'est-à-dire suivant les capacités de stockage et d'écoulement propres à chaque aquifère). Notamment, la réponse à cette nouvelle variabilité climatique sera certainement plus visible sur les nappes libres (tout particulièrement les nappes de petite taille)<sup>50</sup> que sur des nappes captives (souvent profondes) de plus grande taille (Sophocleous, 2002 ; Lee *et al.*, 2006). Au final, le temps de résidence relativement long de l'eau dans le milieu souterrain atténuera certainement temporairement les effets du changement climatique sur certains aquifères (Chen *et al.*, 2004 ; Havril *et al.*, 2018).

## L'évolution des débits des cours d'eau

Les changements des régimes de précipitations et de températures affectent fortement les débits des cours d'eau sous l'altération combinée du ruissellement de surface, de l'évapotranspiration, de la recharge des eaux souterraines et de l'apport d'eau par la fonte des neiges (Patterson *et al.*, 2013). Cependant, ces changements auront certainement un impact différent en fonction des territoires et de la période de l'année (Colmet-Daage *et al.*, 2018). De manière générale, en France métropolitaine, les débits hivernaux pourraient augmenter sur la partie nord et est du pays (soulavant des inquiétudes vis-à-vis des problématiques d'inondation) (Blöschl *et al.*, 2019), alors qu'ils devraient diminuer sur la partie sud (et en particulier dans le quart sud-ouest, avec de possibles diminutions de l'ordre de 20 à 50 %)<sup>51</sup>. Une augmentation des débits hivernaux est également attendue pour les cours d'eau de montagne — résultat de la réduction progressive du manteau neigeux.

En période estivale, il est globalement attendu que les débits diminuent sur l'ensemble du territoire national : de l'ordre de 12 à 30 % en moyenne<sup>52</sup>, mais parfois jusqu'à plus de 50 %, en particulier dans le sud-ouest de la France (d'autant plus que ces pro-

51. <https://www.inrae.fr/sites/default/files/projetexplore2-synthese.pdf> (consulté le 18/08/2025).

52. <https://www.inrae.fr/actualites/explore2-life-eauclimat-cles-ladaptation-gestion-leau> (consulté le 18/08/2025).

jections, issues du projet Explore2, ne prennent pas en compte les autres pressions anthropiques sur la ressource en eau, telles que prélèvements d'eau, urbanisation...). De plus, les assèchements de cours d'eau en tête de bassin versant devraient également progresser dans la majorité des régions et seront plus précoces et plus longs. En zones de montagne, cette diminution des débits estivaux est particulièrement marquée, résultat de la fonte plus précoce (ou de la disparition totale) du manteau neigeux qui avait pour intérêt d'offrir un stockage transitoire aux précipitations (transférant une partie du flux hivernal sur le printemps et l'été) (Berghuijs *et al.*, 2014). En conséquence, ces impacts sur les débits devraient se traduire par des changements marqués dans les régimes hydrologiques, avec une augmentation du régime « pluvial très contrasté » (lié à la diminution des débits d'été) et une très forte disparition des régimes « nival » et « pluvio-nival »<sup>53</sup>.

### L'évolution de l'humidité du sol

L'évapotranspiration, la quantité de précipitations et la recharge des eaux souterraines sont également des flux affectant fortement l'humidité du sol. Leur altération sous l'effet du changement climatique aura ainsi des conséquences marquées sur ce stock naturel — en accentuant les sécheresses des sols (ou sécheresses agricoles) sur tous les territoires et de manière encore plus marquée sur la partie sud de la France (Soubeyroux *et al.*, 2025). En particulier, il est attendu une augmentation de la récurrence et de l'intensité de ce type d'évènement, notamment à travers un allongement des périodes de sécheresse des sols — de l'ordre d'un mois dans la partie nord de la France et de deux mois dans la partie sud. Des événements tels que la sécheresse vécue en 2022 deviendraient ainsi relativement fréquents en été et en automne — certains événements pouvant également s'étaler sur plusieurs années consécutives. Cette accentuation de la sécheresse des sols impactera ainsi fortement la végétation au sein des zones agricoles et des écosystèmes naturels.

## ■ Les effets indirects du changement climatique sur le cycle de l'eau

Le changement climatique risque aussi d'accentuer indirectement les pressions sur le cycle hydrologique à travers la manière dont les activités humaines vont répondre à ce changement des conditions environnementales. Par exemple, sous un climat plus chaud, les rendements des cultures seront réduits dans de nombreuses régions du monde (Turner et Gardner, 2015). En réponse, il est très probable que les superficies cultivées ainsi que les prélèvements en eau soient significativement augmentés, afin de soutenir la production alimentaire et les besoins en eau pour l'irrigation et la production d'eau potable (Wada *et al.*, 2013 ; Haddeland *et al.*, 2014 ; Schewe *et al.*, 2014). Une analyse globale des effets du changement climatique sur les besoins en irrigation avait d'ailleurs suggéré que les deux tiers des surfaces irriguées en 1995

53. <https://www.seminaire-explore2-lifeeauclimat.oieau.fr/programme.html> (consulté le 18/08/2025).

seraient sujettes à une augmentation de leurs besoins en eau à l'horizon 2070 (Döll, 2002). Un tel usage intensif de l'irrigation (en particulier à partir d'eau souterraine) aura donc un effet significatif sur le cycle hydrologique.

Même en l'absence d'expansion des superficies cultivées et de l'irrigation, le changement des conditions climatiques entraînera certainement une modification significative des pratiques agricoles et des endroits où des cultures spécifiques pourraient être cultivées, affectant de fait la structure des paysages agricoles existant actuellement (couverture des sols et sols). Les vignes sont un très bon exemple de culture qui sera très impactée par ces changements (Hayhoe *et al.*, 2004), leur production risquant de diminuer drastiquement dans certaines régions actuellement viticoles (Hannah *et al.*, 2013). Ainsi, en même temps que les conditions climatiques évoluent, il est très probable que les vignobles se déplacent vers des climats plus modérés à des altitudes ou latitudes plus élevées. Cet exemple est également valable pour de nombreuses autres plantes cultivées (blé, orge...), de même que pour tout ce qui touche au domaine de la sylviculture (« culture » d'arbres pour la production de bois). Afin de satisfaire une production future, des espèces provenant de régions plus au sud (plus adaptées à des conditions sèches) sont d'ores et déjà introduites dans les forêts françaises, modifiant de fait la structure et la composition des écosystèmes forestiers endémiques (France 3, 2020). Au final, il a même été suggéré que les effets indirects du changement climatique, à travers ces changements dans les usages de l'eau et des sols, pourraient surpasser ses effets directs (Taylor *et al.*, 2013). Bien que moins sensibles aux effets directs du changement climatique, les nappes captives profondes seront en revanche particulièrement vulnérables aux effets indirects d'une augmentation des prélèvements afin de satisfaire les besoins actuels et futurs sous un climat changeant (Treidel *et al.*, 2012).

## **Les interactions entre pressions climatiques et anthropiques**

Les prélèvements d'eau, les changements de couverture des sols, l'aménagement des cours d'eau et le changement climatique peuvent également affecter le cycle hydrologique à travers un ensemble d'interactions — c'est-à-dire que la réponse hydrologique au changement climatique pourrait être amplifiée ou atténuée en fonction de différents usages de l'eau et des sols. Par exemple, l'urbanisation peut entraîner une augmentation des besoins en eau (Taylor et Tindimugaya, 2012), couplée à des effets sur les eaux de surface et les eaux souterraines, tandis que la reforestation peut augmenter la recharge des nappes (Chaves *et al.*, 2012), ce qui peut atténuer certains effets du changement climatique. Les altérations dans le cycle hydrologique du fait du climat ou de changements de couverture des sols peuvent également affecter significativement la qualité de l'eau (surface ou souterraine). Par exemple, des modifications de pratiques agricoles en réponse à des modifications du climat

(pouvant également favoriser le développement de ravageurs de cultures) pourraient influencer l'usage de produits phytosanitaires et donc augmenter le risque de contaminations des cours d'eau et des eaux souterraines (Bloomfield *et al.*, 2006 ; Noyes *et al.*, 2009). Une réduction de la recharge des nappes, couplée à une augmentation des prélèvements d'eau, peut également exacerber la baisse du niveau des eaux souterraines, pouvant augmenter le risque de contamination à partir d'intrusion d'eau marine salée dans les aquifères côtiers (Werner *et al.*, 2013). Enfin, la pollution des cours d'eau peut aussi être renforcée du fait d'une augmentation des phénomènes d'inondations, tandis qu'une réduction des débits d'étiage peut conduire à une augmentation de la concentration des polluants (Hrdinka *et al.*, 2012). Ces interactions seront néanmoins autant de pistes à considérer permettant possiblement l'adaptation des territoires (voir Partie 2, « Identifier des leviers d'action pour les territoires »).

## 4. Les conséquences sociales des pressions climatiques et anthropiques

Outre les conséquences physiques générées par les activités humaines sur le cycle de l'eau, celles-ci peuvent également avoir d'importantes conséquences pour les sociétés elles-mêmes. En effet, le système naturel (dont la taille, les ressources et les capacités d'absorption sont finies) ne dispose pas de capacités infinies pour soutenir les activités humaines. Le concept de capacité de charge (c'est-à-dire une limite au-delà de laquelle les ressources d'un environnement donné ne peuvent se maintenir sur le long terme) est utilisé depuis longtemps déjà dans les modèles écologiques de dynamique des populations naturelles (Verhulst, 1838 et 1845). Cependant, l'application de ce concept à la population humaine a été relativement controversée. Des croyances fortes, telles que l'immensité des ressources de la Terre, l'intelligence humaine infinie et les progrès technologiques, ou la nécessité absolue de la croissance, ont conduit à l'idée que les sociétés se seraient émancipées des forces écologiques contrôlant toute population naturelle (Fressoz et Bonneuil, 2017).

Pourtant, le « jour du dépassement » (*Earth overshoot day* en anglais)<sup>54</sup> — une date illustrative à partir de laquelle l'humanité est supposée avoir dépassé la capacité annuelle de la Terre à régénérer les ressources naturelles consommées et absorber les déchets produits<sup>55</sup> — nous rappelle chaque année que nos sociétés sont sur une trajectoire non durable. En 2025, cette date a été atteinte le 24 juillet (contre le 29 décembre en 1970). Bien que cette approche ait été critiquée, les preuves empiriques concernant l'épuisement des ressources et la pollution de l'environnement montrent clairement que les activités humaines se sont développées au-delà de la capacité de charge de la Terre. Ce constat est également étayé à travers l'approche des « limites planétaires » (*planetary boundaries* en anglais) (Rockström *et al.*, 2009 ; Steffen *et al.*, 2015), dont le but est de délimiter des seuils à ne pas dépasser à l'échelle mondiale pour que l'humanité puisse vivre durablement dans un écosystème sûr. Cette approche identifie et quantifie les limites planétaires de la pression anthropique sur neuf systèmes et processus biophysiques qui régulent l'état et la résilience du système naturel. En 2023, l'humanité avait dépassé les limites de six systèmes à l'échelle mondiale (Richardson *et al.*, 2023) — et en particulier les limites relatives aux usages de l'eau (eau douce et humidité du sol ; Wang-Erlandsson *et al.*, 2022), aux changements de couverture et d'usage des sols, et au changement climatique.

54. <https://overshoot.footprintnetwork.org> (consulté le 18/08/2025).

55. <https://www.footprintnetwork.org> (consulté le 18/08/2025).



Sans entrer plus en détail dans le débat concernant ces différentes approches, il est certain que la consommation de ressources et la production de déchets et d'émissions au-delà du taux de renouvellement et d'absorption d'un système donné dépassent sa capacité de charge. Jusqu'à présent, nos sociétés modernes ont pu croître bien au-delà de la capacité de charge de la Terre en utilisant des ressources non renouvelables, telles que les combustibles et les eaux souterraines fossiles (Konikow et Kendy, 2005). Cependant, le dépassement indéfini de cette capacité de charge conduit nécessairement à des trajectoires non durables (Motesharrei *et al.*, 2016) — pouvant à terme générer d'importantes conséquences sur les sociétés humaines (Meadows *et al.*, 1972). Bien que l'objectif ne soit pas ici de se focaliser sur cet aspect, il apparaît malgré tout important d'évoquer brièvement ces conséquences sociales, pouvant s'appliquer aussi bien à l'échelle globale qu'à des échelles plus locales de territoires particuliers.

## Les conséquences sociales du changement climatique

Parmi les conséquences les plus attendues — dans un premier temps pour le changement climatique seul — nous pouvons noter : des déplacements géographiques et économiques (Mueller *et al.*, 2014) ; des migrations forcées (McLeman et Smit, 2006) ; un accroissement des inégalités (Islam et Winkel, 2017) ; la destruction d'infrastructures (Forzieri *et al.*, 2018) ; une baisse des rendements agricoles menaçant la sécurité alimentaire mondiale (Lobell *et al.*, 2008 ; Fedoroff *et al.*, 2010 ; Wheeler et Von Braun, 2013) ; une augmentation des conflits (Reuveny, 2007 ; Abel *et al.*, 2019) ; et une augmentation de la propagation de maladies ou d'autres conséquences pour la santé humaine (IPCC, 2022a). À titre d'exemple, une étude récente a suggéré que, d'ici 2070, un tiers de la population mondiale pourrait vivre dans des zones où les températures annuelles moyennes sont supérieures à 29 °C, ce qui n'est actuellement le cas que pour 0,8 % de la surface terrestre, principalement dans le Sahara (Xu *et al.*, 2020). En d'autres termes, au cours des 40 prochaines années, plus de trois milliards de personnes pourraient se retrouver privées des conditions climatiques qui ont permis à l'humanité de prospérer au cours des derniers millénaires — ce qui se traduirait très certainement par un cumul des conséquences listées plus haut.

Cependant, ces conséquences sociales sont loin de toucher uniquement des pays lointains : même au sein de pays développés, les phénomènes météorologiques extrêmes observés ces dernières années (tempêtes, vagues de chaleur, incendies, sécheresses et inondations) ont déjà eu des conséquences importantes sur la santé humaine<sup>56</sup>, l'économie<sup>57</sup>, les infrastructures, l'eau, l'alimentation et la sécurité (USGCRP,

56. [https://www.lemonde.fr/planete/article/2024/08/12/plus-de-47-000-personnes-sont-mortes-de-la-chaleur-en-europe-en-2023\\_6278347\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2024/08/12/plus-de-47-000-personnes-sont-mortes-de-la-chaleur-en-europe-en-2023_6278347_3244.html) (consulté le 18/08/2025).

57. <https://draaf.occitanie.agriculture.gouv.fr/bilan-de-conjoncture-2022-entre-secheresse-precoc-et-marches-destabilises-a7953.html> (consulté le 18/08/2025).

2018). En France, par exemple, l'augmentation des températures et de la variabilité des précipitations peut également générer des problèmes en lien avec la composition des sols. Les sols argileux, en particulier, changent de volume et de consistance selon leur teneur en eau : humides, ils gonflent, et desséchés, ils se rétractent (Jones *et al.*, 2020). Ces variations lentes suffisent à endommager les structures légères comme les maisons et les routes qui reposent dessus. Or, ce phénomène (couramment nommé « retrait-gonflement des argiles »<sup>58</sup>) a tendance à s'accroître sous l'effet du changement climatique (Hadji *et al.*, 2014), générant un important problème pour de nombreuses infrastructures à l'échelle nationale<sup>59</sup>. Il convient toutefois de noter que l'ensemble des territoires n'est pas concerné par ce risque : cela ne concerne que les régions présentant des sols argileux<sup>60</sup>.

La production agricole (et sylvicole) française sera également fortement impactée par les évolutions hydroclimatiques, en particulier dans la partie sud du pays (Zaka, 2025). La récurrence de températures extrêmes (dépassant les 40 °C et allant même jusqu'à 50 °C localement), sur de longues périodes, heurterait l'agriculture à des limites biologiques qu'il semble compliqué de repousser. En effet, au-delà d'une certaine température, irrigation ou non, le rendement de nombreuses cultures estivales serait fortement réduit (voire proche de zéro) : cela concernerait par exemple le maïs, le tournesol, le soja, certaines cultures maraîchères... L'augmentation de ces températures extrêmes présente ainsi un risque important de troubles économiques majeurs pour la profession agricole — sans compter le risque que cela pose sur le plan de la souveraineté alimentaire. Pour finir, en plus de leurs conséquences sur la santé et l'économie, les successions de sécheresses et de canicules poussent également certaines populations à migrer vers d'autres régions (comme la Bretagne) — un phénomène déjà en cours et qui pourrait être amené à s'amplifier grandement à l'avenir<sup>61</sup>.

## Les conséquences sociales des autres pressions anthropiques

De nombreuses autres pressions anthropiques sont également responsables de conséquences sociales similaires — le changement climatique ne représentant qu'une pression additionnelle sur une planète déjà fortement impactée par d'autres bouleversements environnementaux. Par exemple, le déclin continu de la biodiversité met

58. <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/risques/les-mouvements-de-terrain-et-les-erosions-cotieres-ressources/article/retrait-gonflement-des-sols-argileux-plus-de-4-millions-de-maisons> (consulté le 18/08/2025).

59. <https://www.cerema.fr/fr/actualites/phenomene-retrait-gonflement-sols-argileux-rga-definitions> (consulté le 18/08/2025).

60. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/nouveau-zonage-dexposition-au-retrait-gonflement-des-argiles-plus-de-104-millions-de-maisons> (consulté le 18/08/2025).

61. <https://france3-regions.francetvinfo.fr/bretagne/canicule-la-bretagne-va-t-elle-devenir-un-refuge-pour-migrants-climatiques-2564308.html> (consulté le 18/08/2025).

aussi gravement en danger les économies, la sécurité de l'approvisionnement alimentaire mondial et les moyens de subsistance de millions de personnes (IPBES, 2018 ; FAO, 2019). Nos sociétés ont souvent tendance à négliger les services rendus par le système naturel (fertilité des sols, approvisionnement et purification de l'air et de l'eau, pollinisation, régulation de l'atmosphère...) dont elles dépendent et que l'on nomme « services écosystémiques » (MEA, 2003). En effet, outre sa valeur intrinsèque, le système naturel est essentiel au maintien des activités humaines, fournissant à la fois des matières premières (air, nutriments, matériaux, énergie) et absorbant les déchets.

Dans le cadre d'une vision très anthropocentrique et économique de la nature, le bénéfice (financier) de ces services a été notamment débattu depuis une cinquantaine d'années (Westman, 1977). Bien que l'approche soit très discutable (il est difficile, voire impossible, de donner une réelle valeur à ces services), le bénéfice de 17 services écosystémiques avait été estimé entre 125 000 et 145 000 milliards de dollars à l'échelle mondiale (Costanza *et al.*, 2014). Quel que soit le bénéfice réel de ces services, selon un récent rapport des Nations unies, « si la dégradation du système naturel et les pressions sur les ressources mondiales en eau se poursuivent au rythme actuel, 45 % du produit intérieur brut mondial et 40 % de la production céréalière mondiale seront menacés d'ici à 2050 » (WWAP, 2019). Il est donc certain que la perte de ces services — sous l'effet des pressions climatiques et anthropiques — entraînera des conséquences (économiques, mais pas uniquement) significatives pour les sociétés. À la lumière de la récente pandémie de COVID-19, l'émergence de maladies infectieuses pourrait être une autre conséquence de la dégradation du système naturel sur les sociétés humaines (Jones *et al.*, 2008 ; Morand, 2016 ; WWF, 2020).

Parmi de nombreux travaux, il peut être intéressant de mentionner la publication, il y a déjà plus de 50 ans, du rapport « Les limites de la croissance » (*The limits to growth* en anglais) commandé par le Club de Rome (Meadows *et al.*, 1972). Ce travail de prospective mondiale — l'un des premiers du genre — était basé sur des simulations informatiques émergentes utilisant World3, un modèle de dynamique des systèmes qui simulait les interactions entre la population, la croissance industrielle, la production alimentaire et les limites des écosystèmes de la Terre dans différents scénarios. Les résultats de ces simulations étaient particulièrement inquiétants : si l'humanité poursuivait sa croissance sans tenir compte des coûts environnementaux et sociaux, la société mondiale connaîtrait un effondrement des conditions économiques, sociales et environnementales au milieu du <sup>xxi</sup>e siècle. Ces tendances ont été précisées et confirmées par deux mises à jour de ces modèles, publiées en 1992 et 2004. En outre, malgré les nombreuses critiques formulées à l'encontre du modèle utilisé (sa simplicité en particulier), il a été constaté que les données empiriques observées jusqu'à maintenant (donc depuis 50 ans) semblaient suivre relativement bien le scénario *business-as-usual* de 1972 (Turner, 2008 ; Herrington, 2021) — un scénario dans lequel la population mondiale déclinait à partir de la décennie 2030-2040 après un effondrement de l'économie globale. Qu'il s'avère précis ou non, ce

genre d'étude prospective peut laisser songeur sur l'avenir, en particulier en considérant qu'à l'époque les effets du changement climatique ne faisaient pas partie des pressions prises en compte.

## **Vers un effet cumulé des pressions climatiques et anthropiques**

Tous ces impacts soulignent la vulnérabilité des sociétés humaines face à ces risques qui vont survenir de manière cumulée à l'avenir (Mora *et al.*, 2018). Par exemple, bien avant les premiers effets du changement climatique, presque toutes les composantes du cycle hydrologique étaient déjà impactées par les activités humaines (Wagener *et al.*, 2010). Alors que le changement climatique réduira la disponibilité de l'eau, l'augmentation de la consommation d'eau dans les villes densément peuplées et les pratiques agricoles affecteront davantage la quantité et la qualité de l'eau douce. Par conséquent, de nombreuses personnes risquent d'être confrontées à la fois à une réduction de la disponibilité de l'eau et à une augmentation de la fréquence et de l'ampleur des inondations (Di Baldassarre *et al.*, 2009), ce qui risque également d'accentuer les baisses de rendement agricole et leurs conséquences sur la sécurité alimentaire locale comme mondiale.

À titre d'exemple, l'Europe de l'Ouest (comme de nombreuses autres régions du monde) a été confrontée ces dernières années de manière répétée à des inondations catastrophiques (Allemagne et Belgique en 2021<sup>62,63</sup>, France en 2023-2025<sup>64,65</sup>, Espagne en 2024<sup>66</sup>...), générant un bilan humain lourd (des centaines de morts, des déplacements de populations...) et d'importantes pertes économiques. Bien que ces catastrophes soient en partie accentuées par l'intensification des événements météorologiques extrêmes (sous l'effet du changement climatique), les autres pressions anthropiques — et en particulier l'aménagement du territoire (urbanisation, pratiques agricoles...) — ont grandement contribué à exacerber les conséquences physiques et humaines qui en ont découlé.

62. [https://www.lemonde.fr/planete/article/2021/08/24/les-inondations-de-juillet-en-allemande-et-en-belgique-sont-bien-liees-au-rechauffement-climatique\\_6092170\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2021/08/24/les-inondations-de-juillet-en-allemande-et-en-belgique-sont-bien-liees-au-rechauffement-climatique_6092170_3244.html) (consulté le 18/08/2025).

63. <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/climat/inondations-catastrophiques-en-allemande-et-belgique> (consulté le 18/08/2025).

64. [https://www.francetvinfo.fr/meteo/inondations/inondations-dans-le-pas-de-calais-les-records-de-novembre-ont-ete-battus\\_6282630.html](https://www.francetvinfo.fr/meteo/inondations/inondations-dans-le-pas-de-calais-les-records-de-novembre-ont-ete-battus_6282630.html) (consulté le 18/08/2025).

65. [https://www.francetvinfo.fr/meteo/inondations/inondations-en-ardeche-jamais-on-a-connu-une-catastrophe-d-une-telle-ampleur-reagit-le-president-du-conseil-departemental\\_6845132.html](https://www.francetvinfo.fr/meteo/inondations/inondations-en-ardeche-jamais-on-a-connu-une-catastrophe-d-une-telle-ampleur-reagit-le-president-du-conseil-departemental_6845132.html).

66. [https://www.lemonde.fr/idees/article/2024/11/01/inondations-en-espagne-sortir-du-cycle-de-la-sideration-a-l-oubl\\_6370756\\_3232.html](https://www.lemonde.fr/idees/article/2024/11/01/inondations-en-espagne-sortir-du-cycle-de-la-sideration-a-l-oubl_6370756_3232.html) (consulté le 18/08/2025).

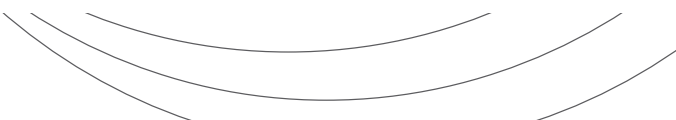
# Partie 2

## Identifier des leviers d'action pour les territoires

Rendre nos territoires plus résilients est une nécessité au regard des nombreux impacts que les activités humaines font porter sur le cycle hydrologique, et en particulier dans une perspective d'adaptation face au changement climatique. Pour répondre à ce défi, la majorité des leviers d'action existent déjà localement. Leur identification nécessite cependant de bien comprendre quels sont les facteurs ayant conduit à la situation actuelle et sur lesquels il sera possible d'agir. Identifier les facteurs humains à la base des bouleversements environnementaux est néanmoins un processus complexe, car résultant de l'entremêlement de facteurs qui interviennent à différentes échelles.

De manière synthétique, tous les facteurs responsables de ces pressions pourraient être reliés à une cause majeure : la consommation excessive et toujours croissante de l'humanité. Selon certains travaux scientifiques, cette consommation humaine totale — et ses impacts sur l'environnement — pourrait se résumer au produit de la population, de la consommation par habitant (richesse, mode de vie) et de la technologie (cf. l'équation IPAT en anglais, pour *Impact = Population × Affluence × Technologie*) (Ehrlich et Holdren, 1971 et 1972). Ajoutés à cela, le patrimoine culturel, les structures de gouvernance, les politiques et les institutions, le contexte économique ou les attitudes sociales sont également d'autres facteurs de changement (Shove, 2010). Parfois, les facteurs locaux jouent un rôle prédominant, de sorte que les changements observés à plus grande échelle peuvent être le résultat de la somme des changements locaux. En revanche, lorsqu'un ensemble de changements observés à l'échelle locale est similaire, il est probable qu'ils soient induits par des facteurs intervenant à une plus grande échelle (politiques, économiques...). En outre, ces facteurs varient également en fonction de l'impact considéré : par exemple, l'expansion urbaine peut avoir des causes différentes de celles à la base des pratiques agricoles.

Dans ce contexte, cette deuxième partie vise ainsi à mieux comprendre ces différents facteurs et à identifier un ensemble de leviers d'action locaux à disposition pour les territoires — regroupés ici au sein de trois grandes catégories :

- solutions sociales et politiques ;
  - solutions fondées sur la nature ;
  - et solutions techniques et technologiques.
- 

Il est important de garder à l'esprit que la liste de leviers proposée n'a nullement vocation à être exhaustive ni universelle. En effet, il n'existe pas de solution unique pouvant être appliquée partout : une solution donnée sur un territoire ne sera pas forcément adaptée à un autre. L'objectif est donc uniquement de lister une partie des leviers d'action locaux retrouvés dans la littérature, leur mise en œuvre devant ensuite être décidée en fonction du contexte local. De plus, alors que ces catégories de solutions sont parfois mises en opposition, il semblerait au contraire judicieux de les envisager en complémentarité — imposant une forme d'innovation territoriale afin de sortir de visions binaires simplistes. En d'autres termes, c'est à travers une diversité de solutions, propres à chaque territoire, que naîtront les possibilités d'adaptation. Cette combinaison de leviers d'action locaux est d'ailleurs déjà mobilisée par un certain nombre de territoires, comme (parmi bien d'autres) à l'échelle du bassin versant de la Vienne<sup>67</sup>.

---

67. [https://www.gesteau.fr/sites/default/files/gesteau/content\\_files/document/Guide-adaptation-chgt-climatique\\_web-150dpi.pdf](https://www.gesteau.fr/sites/default/files/gesteau/content_files/document/Guide-adaptation-chgt-climatique_web-150dpi.pdf) (consulté le 18/08/2025).

## 5. Solutions sociales et politiques

Cette catégorie regroupe un ensemble de solutions s'appuyant sur des changements d'organisation au niveau social et politique, principalement dans le but d'agir sur les comportements afin de réduire autant que possible les pressions sur l'eau et les sols. Face à la raréfaction de la ressource en eau, une réduction des prélèvements (diminution des besoins) est notamment une des premières mesures à mettre en avant — un constat également partagé par la Cour des comptes qui, dans un rapport publié en juillet 2023<sup>68</sup>, indique qu'« une stratégie déterminée de réduction des prélèvements d'eau et d'utilisation raisonnée de la ressource est seule susceptible d'apporter une solution de long terme ». Dans un objectif de rendre les territoires plus résilients, cet ensemble de solutions sociales et politiques est donc à considérer en priorité (avant d'envisager d'autres catégories) — les leviers proposés étant également souvent un prérequis à la mise en œuvre d'autres solutions (en particulier les solutions fondées sur la nature).

### Utiliser et faire respecter le cadre législatif et réglementaire

Les activités humaines sont en partie régies par un cadre législatif et réglementaire (lois, réglementation...) qui vise à poser les règles fondamentales organisant la vie de la société. À la fois défini par les différentes structures de gouvernance et les institutions, ce cadre est également là pour structurer la gouvernance et les institutions en elles-mêmes, ainsi que pour fournir de nombreux outils de gestion (voir section suivante).

Le cadre législatif, tout d'abord, désigne ainsi l'ensemble des textes « de loi » votés par le Parlement (Assemblée nationale et Sénat) et promulgués par le président de la République. À titre d'exemple, en France, la Loi sur l'eau de 1964<sup>69</sup> a instauré le principe d'une gestion de l'eau par grands bassins versants (les bassins hydrographiques rattachés aux grands fleuves français). Cette loi est également à l'origine de la création des agences de l'Eau (voir section suivante). Par la suite, la Loi sur l'eau de 1992<sup>70</sup> a permis d'organiser la planification dans ce domaine à travers l'élaboration des schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (Sdage) pour chacun des bassins

68. <https://www.ccomptes.fr/system/files/2023-07/20230717-gestion-quantitative-de-l-eau.pdf> (consulté le 18/08/2025).

69. Loi n° 64-1245 du 16 décembre 1964 relative au régime et à la répartition des eaux et à la lutte contre leur pollution.

70. Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau.

hydrographiques. Cette loi a également établi une obligation de déclaration et de demande d'autorisation pour les projets pouvant avoir un impact sur les ressources en eau. Plus récemment, la Loi sur l'eau et les milieux aquatiques (Lema) de 2006<sup>71</sup> (correspondant à la transposition en droit français d'une directive européenne) dicte une importante partie de la gestion actuelle de l'eau en France.

Le cadre réglementaire, quant à lui, désigne l'ensemble des textes élaborés par le pouvoir exécutif (c'est-à-dire élaborés par les ministres et signés par le Premier ministre ou le président de la République) pour préciser l'application des lois votées par le Parlement. Ces textes ont pour but de doter les lois de précisions et de détails d'application nécessaires. Les réglementations peuvent ainsi inclure, notamment, des limites aux atteintes à l'environnement, à la sécurité des aliments et des médicaments, à la santé, à l'urbanisme, ou encore au travail.

Au final, les textes législatifs ont une portée générale et sont applicables à l'ensemble du territoire, tandis que les textes réglementaires sont plus précis et concernent souvent des détails d'application plus restreints. Ils sont également souvent applicables à un secteur ou une région géographique spécifique. Ce cadre législatif et réglementaire peut ainsi fortement influencer sur les impacts des activités humaines.

En France, une grande partie du cadre législatif et réglementaire existant permet déjà de mieux intégrer les enjeux des bouleversements environnementaux actuels et à venir à l'échelle locale. Le problème est que ces outils évoluent continuellement, les rendant difficilement appréhendables (Barone *et al.*, 2018). Il existe ainsi souvent un certain décalage entre l'évolution du cadre législatif et réglementaire et sa mise en œuvre à l'échelle locale (Ganivet *et al.*, 2024b). À titre d'exemple, parmi bien d'autres, il aura fallu un certain temps pour que les objectifs de la Loi littoral (votée en 1986) soient mis en œuvre réglementairement de manière effective sur l'ensemble du territoire national (Miossec, 2015). Ainsi, avant d'envisager de le renforcer, il semble d'abord pertinent de questionner l'application et le respect du cadre existant à l'échelle des territoires.

Une autre difficulté consiste à appliquer correctement et de manière impartiale cette réglementation lors de l'instruction des dossiers. Notamment, les médias font ponctuellement écho de décisions de justice annulant des autorisations, octroyées par les services de l'État (préfectures), à la construction d'imposants projets d'aménagement. À titre d'exemple, 15 projets de réserves de substitution (dites aussi « méga-bassines ») s'étaient vus annulés par un tribunal administratif le 3 octobre 2023 en vertu du principe de gestion équilibrée et durable de la ressource en eau<sup>72</sup>. Parmi les arguments avancés apparaissaient notamment la non-prise en compte du changement climatique et l'inadéquation de ces projets avec la capacité des milieux à fournir de l'eau dans des conditions écologiques satisfaisantes. Dans un objectif de respect de

71. Loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques.

72. [https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/10/03/megabassines-la-justice-annule-les-projets-de-quinze-retenues-d-eau-en-nouvelle-aquitaine\\_6192224\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/10/03/megabassines-la-justice-annule-les-projets-de-quinze-retenues-d-eau-en-nouvelle-aquitaine_6192224_3244.html) (consulté le 18/08/2025).



la Loi sur l'eau, en juillet 2024, ce même tribunal administratif a également décidé de réduire de près d'un quart les prélèvements autorisés pour l'irrigation agricole dans le Marais poitevin<sup>73</sup>. Le tribunal et la cour ont ainsi jugé « excessifs » les prélèvements précédemment autorisés — notamment suite à la création de réserves de substitution ayant conduit à une augmentation nette des prélèvements annuels.

## Adapter la gouvernance locale

La gouvernance fait référence aux processus d'organisation, de prise de décision et à leur application au sein d'une société organisée et de ses institutions (Bevir, 2012), servant ainsi de cadre aux activités humaines. Il existe de nombreux types de gouvernance dans le monde, notamment en ce qui concerne la gestion des ressources naturelles. La manière dont s'organise cette gouvernance pourra ainsi directement affecter les impacts des activités humaines sur l'environnement. Comme illustré tout au long de cet ouvrage, les questions environnementales (en particulier liées à l'eau) étant avant tout des questions complexes (c'est-à-dire multicausales), cette gouvernance nécessite l'approche la plus systémique et transversale possible (Theys, 2003). De plus, la variabilité des caractéristiques propres à chaque territoire nécessite que ces questions soient pensées à une échelle locale. Pour toutes ces raisons, de manière générale, en France, les questions environnementales ont conduit à une territorialisation des politiques publiques (Salles, 2006), permettant une émergence et une autonomisation croissante de systèmes d'action locaux (Van Tilbeurgh, 2014).

Cette volonté politique de favoriser les approches intégratives de l'environnement aux différentes échelles de gestion (Ghiotti, 2007) s'observe ainsi à travers le rapprochement entre acteurs et outils issus du monde de l'eau et ceux issus du monde de l'urbanisme et de l'aménagement (Barone *et al.*, 2018). Cela a conduit à la création et l'emboîtement successifs d'outils d'action publique toujours plus nombreux, procédant à un maillage de plus en plus systématique du territoire. Cet emboîtement d'échelles, ainsi que la présence de nombreuses compétences et outils de planification, place notamment l'échelle intercommunale au croisement d'enjeux à la fois locaux et plus régionaux (en particulier depuis les lois NOTRe<sup>74</sup>, Maptam<sup>75</sup> et la réforme Gemapi<sup>76</sup>). En France, l'intercommunalité désigne l'ensemble des acteurs et organismes de coopération associant, pour tout ou partie, des communes pour l'exercice de certaines de leurs compétences (établissements publics de coopération

73. <https://www.20minutes.fr/societe/4100456-20240709-marais-poitevin-justice-reduit-volumes-irrigation-cause-megabassines> (consulté le 18/08/2025).

74. Loi n° 2015-991 du 7 août 2015 de Nouvelle Organisation Territoriale de la République (NOTRe).

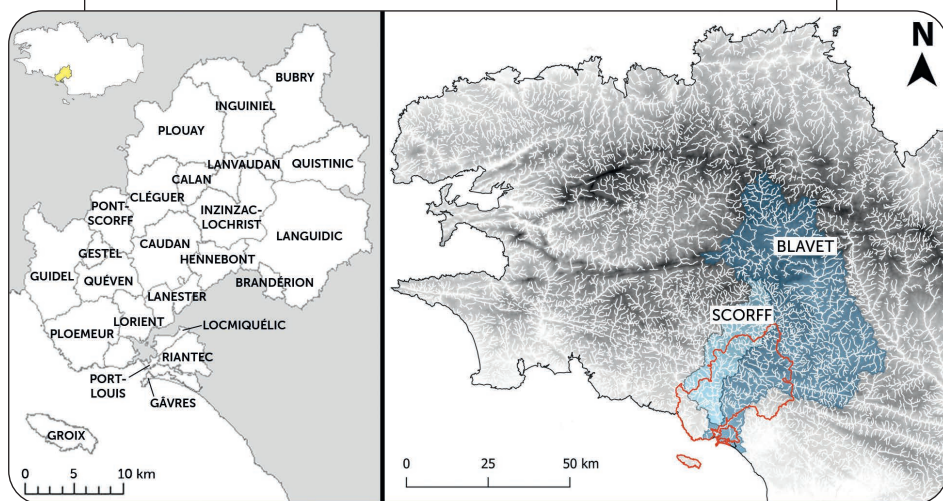
75. Loi n° 2014-58 du 27 janvier 2014 de Modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles (Maptam).

76. Loi n° 2017-1838 du 30 décembre 2017 relative à l'exercice des compétences des collectivités territoriales dans le domaine de la gestion des milieux aquatiques et de la prévention des inondations (Gemapi).

intercommunale [EPCI], syndicats mixtes...). Au 1<sup>er</sup> janvier 2023, la France comptait ainsi 10 031 intercommunalités se répartissant en 1 254 EPCI à fiscalité propre (21 métropoles, 14 communautés urbaines, 227 communautés d'agglomération et 992 communautés de communes) et 8 777 syndicats ou autres groupements<sup>77</sup>.

Dans ce contexte, cette section vise à présenter le fonctionnement de la gouvernance (grands acteurs et outils) mise en œuvre dans le cas de la gestion de l'eau et de l'aménagement du territoire en France. Dans un second temps, elle proposera plusieurs pistes d'amélioration pouvant être mises en œuvre à l'échelle locale. Pour cela, cette section s'appuiera sur l'exemple de l'intercommunalité de Lorient Agglomération (le travail dont est issu cet ouvrage ayant initialement été conduit sur ce territoire). Située en région Bretagne, à l'ouest du département du Morbihan (fig. 5.1), Lorient Agglomération constitue une communauté d'agglomération regroupant 25 communes. D'un point de vue hydrologique, le territoire de Lorient Agglomération est situé au niveau de l'exutoire (dans la rade de Lorient) de deux importants bassins versants bretons : le Scorff (~ 500 km<sup>2</sup>) et surtout le Blavet (~ 2 000 km<sup>2</sup>). Bien que certaines nuances puissent exister en fonction de chaque territoire, les principes de gestion présentés ici devraient être assez similaires ailleurs. L'objectif est ainsi de pouvoir identifier quels sont les outils et acteurs à disposition sur son territoire — et avec lesquels il sera possible de collaborer à l'atteinte d'une trajectoire durable.

**Figure 5.1.** Localisation de l'intercommunalité de Lorient Agglomération et des bassins versants du Scorff et du Blavet en Bretagne.

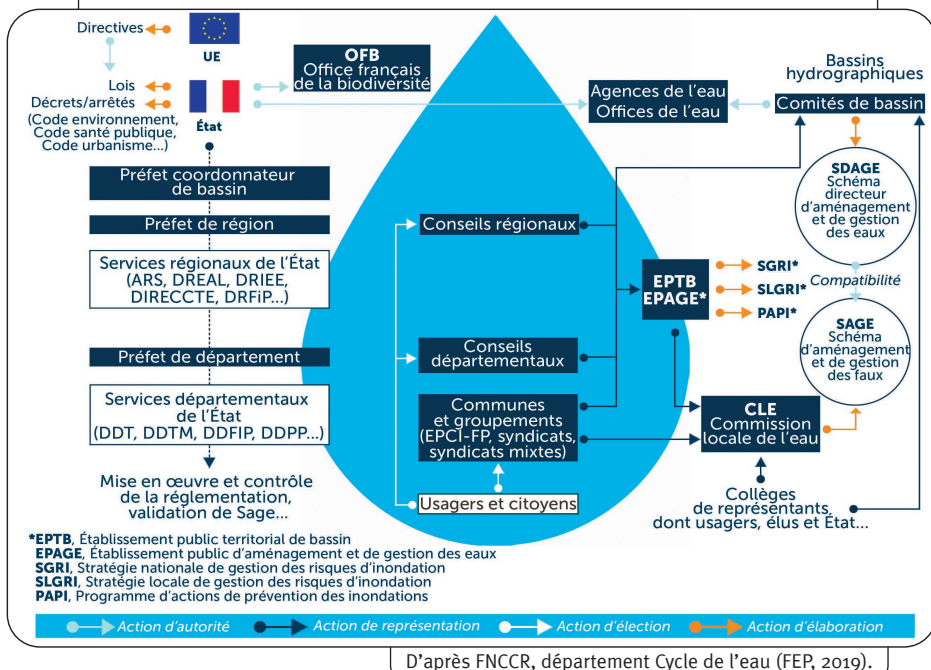


77. [https://www.collectivites-locales.gouv.fr/files/Accueil/DESL/2023/BATweb-DGCL-CL\\_en\\_chiffres\\_2023.pdf](https://www.collectivites-locales.gouv.fr/files/Accueil/DESL/2023/BATweb-DGCL-CL_en_chiffres_2023.pdf) (consulté le 18/08/2025).

## ■ Les acteurs et outils de la gestion de l'eau

En France, suivant la Loi sur l'eau de 1992 (renforcée en 2006), les dernières décennies ont été marquées par une volonté affichée par les pouvoirs publics en faveur d'une gestion dite « intégrée » de l'eau. Celle-ci vise à « favoriser le développement et la gestion coordonnés des ressources en eau, du sol et des ressources associées, permettant de maximiser les bénéfices économiques et sociaux, de façon équitable sans compromettre la pérennité des écosystèmes vitaux »<sup>78</sup>. Parmi les principes fondamentaux d'une gestion intégrée de l'eau — telle qu'adoptée durant la Conférence internationale sur l'eau et l'environnement de Dublin (1992) —, se retrouve la nécessité que « la gestion et la mise en valeur des ressources en eau associent usagers, planificateurs et décideurs à tous les échelons ». Ce mode de gestion a ainsi conduit, en France, à l'implication d'un très grand nombre d'acteurs qui interagissent à plusieurs échelles géographiques entremêlées, dans lesquelles interfèrent des orientations générales émanant d'instances centrales avec des décisions territorialisées négociées entre les acteurs concernés par la gestion locale de l'eau (fig. 5.2).

**Figure 5.2.** Les principaux acteurs de la gestion de l'eau en France en 2025.



78. <https://iwr.mactionhub.org/about/iwrm-explained> (consulté le 18/08/2025).

## L'échelle européenne

Du côté des organismes définissant les grandes orientations de la gestion de l'eau, on retrouve, tout d'abord, au niveau européen, l'Union européenne qui définit un cadre commun aux États membres, à l'image de la Directive-cadre sur l'eau (DCE) de 2000 (directive 2000/60/CE) en faveur de l'amélioration de la qualité des eaux, ou encore relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation de 2007 (directive 2007/60/CE) (Lavarde *et al.*, 2022).

## L'échelle nationale

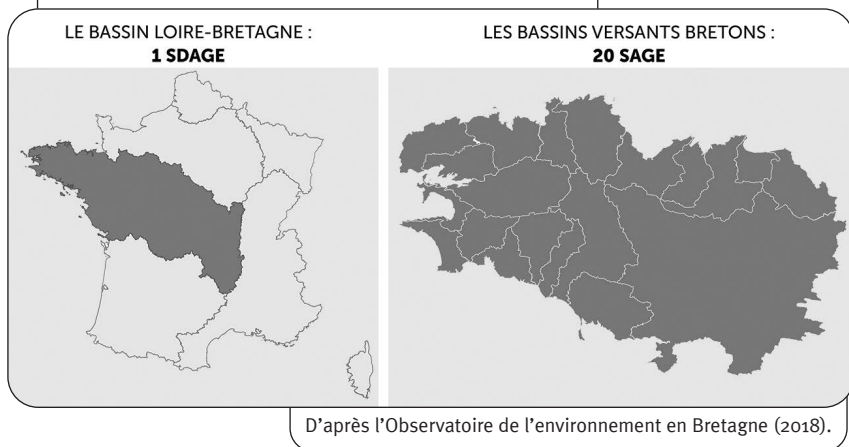
Ensuite, en conformité avec ces directives européennes, l'État est chargé de piloter la politique de l'eau au niveau national (lois, décrets, arrêtés...) — principalement à travers son ministère chargé de l'Environnement, parfois en lien avec d'autres ministères (Agriculture, Santé, Industrie) pour certains usages de l'eau ou des aspects plus transversaux de gouvernance. Pour la mise en œuvre de cette politique, l'État peut également s'appuyer sur le Comité national de l'eau, une instance nationale de consultation placée auprès du ministre chargé de l'Environnement, afin d'examiner les questions communes aux grands bassins hydrographiques. Ce comité comprend 160 membres, incluant notamment des représentants des usagers, des collectivités territoriales, de l'État et de ses établissements publics, ainsi que les présidents des comités de bassin. L'État s'appuie également sur l'Office français de la biodiversité (OFB), un établissement public qui contribue, sur les milieux terrestres, aquatiques et marins, à la surveillance, la préservation, la gestion et la restauration de la biodiversité, ainsi qu'à la gestion équilibrée et durable de l'eau en coordination avec la politique nationale. L'OFB est notamment chargé d'apporter des conseils techniques quant aux impacts environnementaux de nouveaux projets sur les territoires. Les agents de l'OFB ont aussi une mission de contrôle, contribuant à l'exercice de la police administrative et judiciaire relative à l'eau.

## L'échelle des bassins hydrographiques

Coordonnée au niveau national, la gestion de l'eau s'effectue ensuite au niveau des bassins hydrographiques des grands fleuves. Il en existe six en France métropolitaine : Rhin-Meuse, Artois-Picardie, Seine-Normandie, Loire-Bretagne, Adour-Garonne, et Rhône-Méditerranée-Corse. À titre d'exemple, en Bretagne, la gestion de l'eau dépend ainsi du bassin hydrographique Loire-Bretagne, qui représente 28 % de la surface métropolitaine (~ 157 000 km<sup>2</sup>) (fig. 5.3). Deux organes structurent en suivant la gestion de l'eau au sein de chaque bassin hydrographique, principalement au point de vue planification et incitations financières : un Comité de bassin et une agence de l'Eau.

Tout d'abord, le Comité de bassin — réunissant des acteurs publics et privés de l'eau — est une instance de concertation qui élabore la politique de gestion de l'eau sur le bassin. Il est notamment en charge de l'élaboration du schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (Sdage) — un outil de planification devant (au titre de

**Figure 5.3.** Différence d'échelle entre Sdage et Sage dans le contexte de la gestion de l'eau en Bretagne.



la DCE) cadrer la politique de la ressource en eau et de la protection des milieux naturels pour tout le bassin hydrographique. Sur le bassin Loire-Bretagne, par exemple, plusieurs enjeux sont définis au sein du Sdage 2022-2027 :

- réduire l'impact des activités humaines sur les milieux aquatiques ;
- assurer une eau de qualité pour des activités et usages respectueux des milieux aquatiques ;
- maîtriser la gestion quantitative de l'eau dans la perspective du changement climatique ;
- et privilégier une approche territoriale et placer l'eau au cœur de l'aménagement du territoire.

En parallèle, l'agence de l'Eau — un établissement public à caractère administratif de l'État — a pour mission de :

- soutenir financièrement et techniquement des travaux d'amélioration des milieux aquatiques et de réduction des pollutions ;
- assister le comité de bassin dans l'élaboration du Sdage ;
- produire des données qualitatives sur l'eau ;
- et mettre en œuvre la gestion intégrée de la ressource.

L'agence de l'Eau exerce sa mission dans le cadre de programmes d'action pluriannuels financés à partir de diverses redevances prélevées sur les factures d'eau. Confronté à l'enjeu du changement climatique, l'ensemble des agences de l'Eau a également établi des plans d'adaptation respectifs entre 2014 et 2019 (Salles, 2022). Cependant, à l'échelle locale, l'agence de l'Eau n'a pas d'outils réglementaires contraignants à

travers des suivis et contrôles. Elle a principalement pour rôle d'impulser des actions au niveau du bassin hydrographique en incitant financièrement les maîtres d'ouvrage locaux à réaliser des actions correspondant aux enjeux définis dans le Sdage.

Conjointement avec les Sdage, la France dispose également, à l'échelle des grands bassins hydrographiques, de Plans de gestion des risques d'inondation (PGRI). S'appuyant sur la Stratégie nationale de gestion des risques d'inondation (SNGRI), ces documents de planification visent à traduire la Directive européenne relative à la prévention des inondations dans une même logique de prise en compte des périmètres hydrographiques. Les PGRI fixent notamment les grands objectifs en matière de gestion des risques d'inondation et les objectifs propres à certains territoires à risque d'inondation important.

### **L'échelle des sous-bassins versants**

La mise en œuvre locale des politiques de l'eau est ensuite prise en charge par les collectivités territoriales et leurs groupements. Tout d'abord, les grandes orientations définies par le Sdage sont déclinées localement par le biais (lorsqu'il y en a) de schémas d'aménagement et de gestion des eaux (Sage). Ce document de planification, déployé à l'échelle de sous-bassins hydrographiques, vise à définir et mettre en œuvre une politique locale cohérente en matière de gestion de l'eau et des écosystèmes, afin de satisfaire les besoins de tous, sans porter atteinte à la ressource en eau et aux milieux aquatiques. Chaque Sage est élaboré par une Commission locale de l'eau (CLE) comprenant des représentants de l'État, des collectivités locales et des usagers. La CLE intervient également dans la validation de demandes de financement auprès de l'agence de l'Eau en faveur de projets touchant à son bassin versant. Ainsi, le rôle des CLE est principalement de fournir un cadre (à travers les orientations du Sage notamment) et un lieu d'échange et de débat autour des questions liées à la gestion locale de l'eau. À titre d'exemple, à l'échelle de la Bretagne, l'ensemble des bassins versants sont regroupés au sein de 20 Sage (voir fig. 5.3), dont quatre recoupent en partie le territoire de Lorient Agglomération : le Sage Scorff, le Sage Blavet et, plus marginalement, le Sage Ellé-Isole-Laiïta et le Sage golfe du Morbihan et Ria d'Étel.

En 2024, seulement 55 % du territoire national étaient couverts par des Sage<sup>79</sup>. Cependant, l'objectif est de recourir à cet outil uniquement lorsque cela est nécessaire à l'atteinte des objectifs du Sdage — en particulier en cas de besoin de prise en compte d'enjeux locaux ou de résolution de conflits d'usage. Ainsi, de nombreux autres outils de programmation ou de planification locale sont également utilisés en complémentarité des Sage à l'échelle nationale. En premier lieu, les contrats de milieu (de bassin, de rivière, de nappe...) sont des outils contractuels spécifiques dans lesquels des maîtres d'ouvrage s'engagent — à l'échelle de sous-bassins versants, de nappe, de lac — à réaliser des actions pour améliorer la qualité de l'eau et des milieux

79. <https://www.gesteau.fr/presentation/sage> (consulté le 18/08/2025).

aquatiques, en déclinant, selon les mêmes principes que pour les Sage, les objectifs majeurs du Sdage. À la différence des Sage — dont l'objet essentiel est de formaliser un projet commun pour l'eau dans le bassin assorti de règles de bonne conduite pour le mettre en œuvre — l'objectif des contrats de milieux est d'aboutir à un programme d'actions volontaire et concerté (études, travaux...), généralement à horizon 3-6 ans, avec un engagement financier contractuel (mode de financement, maîtres d'ouvrage, échéances des travaux...). À noter que, dans certains cas, le contrat de milieu peut également être une déclinaison opérationnelle d'un Sage (Lavarde, 2022). Pour finir, d'autres outils visant à l'atteinte d'objectifs similaires peuvent être rencontrés (contrats territoriaux, contrats thématiques, contrats globaux...). Ils sont cependant plus anecdotiques, car étant propres à chaque bassin hydrographique, et ne sont pas déployés partout à l'échelle nationale. De plus, dans le domaine de la prévention des inondations, les PGRI peuvent également être déclinés, pour certains territoires, en stratégies locales de gestion des risques d'inondation (SLGRI) qui sont élaborées par les parties prenantes désignées à cet effet (Lavarde, 2022).

Le portage de ces divers outils de planification locaux est ensuite assuré par des structures pouvant varier d'un territoire à l'autre (collectivité ou groupement de collectivités territoriales, institution interdépartementale, syndicat intercommunal, syndicat mixte...). Par exemple, dans le cas de trois des Sage recoupant Lorient Agglomération, une structure unique de planification assure le portage et l'appui technique des trois CLE associées : le syndicat mixte Blavet Scorff Ellé-Isole-Laita. Ces structures sont également là pour accompagner les maîtres d'ouvrage dans la mise en œuvre d'actions particulières sur leur territoire (telles que : réductions de pollutions, amélioration des pratiques, effacement d'un plan d'eau...).

Dans le cas de certains bassins versants (de grandes tailles généralement), des syndicats mixtes spécialisés ayant le statut d'établissement public territorial de bassin (EPTB)<sup>80</sup> peuvent également porter la gestion locale de l'eau — à travers des compétences propres en plus des compétences de leurs membres (c'est-à-dire de collectivités territoriales, d'EPCI...). C'est le cas notamment pour la Vilaine en Bretagne (EPTB Vilaine), ou encore la Garonne (Smeag) et l'Adour (Institution Adour) dans le Sud-Ouest. Depuis une dizaine d'années, les Établissements publics d'aménagement et de gestion de l'eau (Epage)<sup>81</sup> sont également d'autres syndicats mixtes spécialisés pouvant exercer — uniquement à travers les compétences issues de leurs membres — la gestion des milieux aquatiques et la prévention des inondations. À noter que ni la constitution d'un Epage, ni celle d'un EPTB ne sont des obligations, de même qu'un EPTB peut mener des missions d'Epage sur tout ou partie de son territoire. Au final, Epage et EPTB ne constituent donc pas un ensemble totalement structuré ni hiérarchisé et toutes les combinaisons imaginables semblent possibles (Lavarde, 2022).

80. Définis en 2003 par la loi relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages (article L.213-12 du Code de l'environnement).

81. Définis en 2014 par la loi Maptam (article L.213-12 du Code de l'environnement).



Enfin, il peut également être utile de mentionner un outil assez récent, en cours de déploiement dans de nombreux territoires : le projet de territoire pour la gestion de l'eau (PTGE)<sup>82</sup>. En complémentarité avec le reste des outils disponibles, le PTGE vise à l'atteinte, dans la durée, d'un équilibre entre les usages et les ressources disponibles dans les territoires<sup>83</sup>, en respectant la bonne fonctionnalité des écosystèmes aquatiques, en anticipant le changement climatique et en s'y adaptant<sup>84</sup>. Conduite à une échelle cohérente d'un point de vue hydrologique ou hydrogéologique (bassins versants ou sous-bassins versants), cette démarche s'appuie sur un diagnostic et un dialogue avec l'ensemble des usagers de l'eau du territoire (eau potable, agriculture, industries, navigation, énergie, pêches, activités récréatives...), dans le but de déterminer un programme d'actions (un projet global et partagé) à mettre en œuvre, en vue de faciliter la préservation et la gestion de la ressource en eau. Ces PTGE, pouvant être portés par une multitude d'acteurs en fonction des territoires (président de CLE, président d'EPTB ou d'EPAGE...), s'articulent ensuite avec les autres outils de gestion de l'eau disponibles localement (Sdage, Sage...).

### L'échelle communale et intercommunale

À une échelle plus fine, ce sont les communes et leurs groupements (intercommunalités ou syndicats intercommunaux ou mixtes) qui, historiquement, se sont engagés depuis longtemps dans la distribution publique de l'eau et l'assainissement des eaux usées (FEP, 2019). Ces collectivités locales sont donc des autorités organisatrices de ces services publics, soit *via* une gestion déléguée à une structure généralement privée — telle que Veolia ou Saur (délégation de service public) —, soit en gestion directe par la collectivité (gestion en régie). Cependant, au cours de la dernière décennie, un ensemble de réformes territoriales (loi NOTRe, loi Maptam, réforme Gemapi) a donné lieu à de nombreux transferts de compétences à l'échelle des EPCI. De fait, comme de nombreuses intercommunalités à présent, Lorient Agglomération s'est vu attribuer la compétence « Eau et assainissement », à laquelle se sont ajoutées les compétences « Gestion des eaux pluviales » et « Gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations » (Gemapi). La combinaison de ces compétences permet alors à l'intercommunalité de devenir le principal gestionnaire de la ressource en eau sur son territoire. Sur d'autres territoires, cette gestion peut être effectuée en collaboration avec un syndicat mixte qui conserve une partie des compétences (par exemple l'assainissement et la gestion des milieux aquatiques).

82. <https://www.legifrance.gouv.fr/download/pdf/circ?id=44640> (consulté le 18/08/2025).

83. *Ibid.*

84. <https://agriculture.gouv.fr/les-projets-de-territoire-pour-la-gestion-de-leau-ptge-au-service-dune-agriculture-durable> (consulté le 18/08/2025).



## L'échelle régionale et départementale : services déconcentrés de l'État

Même à l'échelle locale, la gestion de l'eau reste en partie assujettie à une validation par des services déconcentrés de l'État. En particulier, la direction départementale des Territoires et de la Mer (DDTM) et l'agence régionale de Santé (ARS) sont deux services chargés — de façon complémentaire — de veiller à l'application de la réglementation au niveau local dans différents domaines. Concernant l'ARS, structurée en antennes au niveau départemental, elle est chargée de veiller à l'application de la réglementation sur les volets sanitaires — en particulier *via* l'instruction des dossiers des collectivités (ou leurs groupements) relatifs aux aspects réglementaires inscrits au Code de la santé publique (demande d'autorisation préfectorale). En matière d'eau, l'ARS est notamment en charge du contrôle sanitaire de la qualité de l'eau potable et des eaux liées à d'autres usages (baignade, pêche, activités nautiques), de l'instauration des périmètres de protection des captages et de l'application du Règlement sanitaire départemental. En plus de ce volet de contrôle, l'ARS assume également des missions d'accompagnement des acteurs, mais aussi des missions de prévention et de communication vis-à-vis des enjeux sanitaires.

Dans le cas de la DDTM, son premier rôle est l'instruction des dossiers des collectivités (ou leurs groupements) pour veiller à la conformité des projets avec les aspects réglementaires inscrits au Code de l'environnement (police de l'eau). Cela concerne notamment les demandes de déclaration et d'autorisation préfectorales, par exemple pour des travaux en milieu aquatique, une suppression de cours d'eau, une création de retenue collinaire, ou encore la mise en place de captages destinés à l'alimentation en eau potable. Le second rôle de la DDTM concerne l'aspect « contrôle », qui vise à s'assurer que la réglementation est bien respectée. Il peut s'agir, par exemple, de contrôles sur des captages (état, débits prélevés, périodes de prélèvement...), des travaux de restauration de cours d'eau ou de zones humides, ou encore des rejets de stations d'épuration. Notons que la DDTM est également chargée de piloter (sous l'autorité du préfet de département et du procureur de la République) la Mission interservice de l'eau et de la nature (Misen). Réunissant les services de l'État et les établissements publics intervenant dans les domaines de l'eau et de la nature au niveau du département, elle a pour but d'améliorer l'efficacité, la cohérence et la lisibilité de l'action publique.

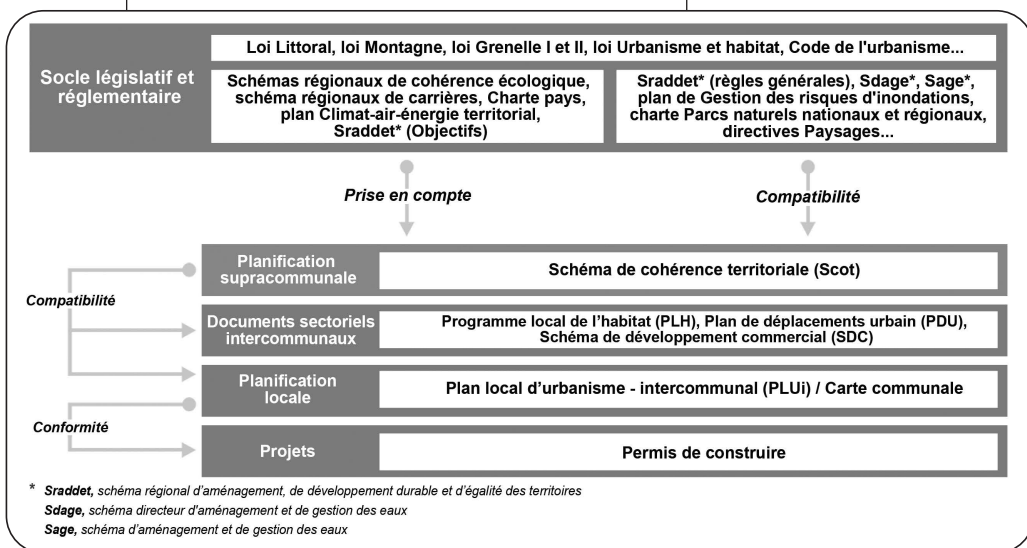
Enfin, la direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (Dreal) est un service déconcentré de l'État, placé sous l'autorité du préfet de Région, chargé d'élaborer et de coordonner les politiques de l'État en matière d'environnement, de développement et d'aménagement durables (changement climatique, qualité des milieux, préservation de la biodiversité et des paysages, prévention des pollutions, des risques), ainsi qu'en matière de logement, d'hébergement, de rénovation urbaine et de transports, en recherchant la cohérence entre ces enjeux. Par ailleurs, la Dreal est chargée d'assister les autorités administratives compétentes en matière d'environnement, ce qui inclut la ressource en eau, dans le cadre de procédures réglementaires sur des programmes et projets. Elle contribue également à l'information, à l'éducation des

citoyens sur les enjeux du développement durable, à leur sensibilisation aux risques, tout en cherchant à promouvoir leur participation dans l'élaboration des projets ayant une incidence sur l'environnement ou l'aménagement du territoire.

## ■ Les outils de l'aménagement du territoire

En France, la planification territoriale est chargée de décliner à l'échelle locale les grandes orientations nationales. Elle vise à assurer le respect de l'équilibre entre le développement urbain d'une part, et la protection des espaces naturels, agricoles et forestiers d'autre part. Elle s'appuie sur un cadre législatif et réglementaire précis, ainsi que sur des documents d'urbanisme, intervenant à différentes échelles géographiques et soumis à un enchevêtrement de normes (fig. 5.4). Qu'ils soient réalisés à l'échelle du bassin d'emploi ou déclinés à l'échelle intercommunale ou communale, ces documents permettent de définir des orientations en matière de préservation des espaces naturels agricoles et forestiers, d'habitat, de transport et déplacement, de performance environnementale et énergétique, d'aménagement commercial, et de qualité urbaine, architecturale et paysagère. Ils sont élaborés, dans la majorité des cas, par les collectivités territoriales ou leurs groupements, en concertation avec les habitants. Trois échelons de documents de planification différents sont présentés ci-dessous.

**Figure 5.4.** Hiérarchie des normes en aménagement du territoire et urbanisme.



## L'échelle régionale : le Sraddet

Tout d'abord, en 2015, la loi NOTRe a introduit l'élaboration d'un schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (Sraddet) parmi les attributions des Régions en matière d'aménagement du territoire. Document unique et transversal, ce « Schéma des schémas » vise à fixer des objectifs de moyen et long termes en lien avec plusieurs thématiques, parmi lesquelles peuvent être citées : habitat, gestion économe de l'espace, équilibre et égalité des territoires, désenclavement des territoires ruraux, lutte contre le changement climatique, pollution de l'air, protection et restauration de la biodiversité. Selon la hiérarchie des normes, les *objectifs* du Sraddet s'imposent ensuite aux documents d'échelons inférieurs dans un rapport de « prise en compte », tandis que ces mêmes documents doivent être en « compatibilité » avec les *règles générales* du Sraddet. À titre d'exemple, en Région Bretagne, après un long processus d'élaboration et de consultation, un Sraddet a été adopté en 2020<sup>85</sup>. Il comporte un ensemble d'orientations stratégiques autour de 38 objectifs, ainsi que des mesures à caractère réglementaire, bien que toutefois limitées. Ce document renforce de fait le rôle d'autorité coordinatrice et organisatrice de la Région en matière d'aménagement du territoire, en lien étroit avec les EPCI.

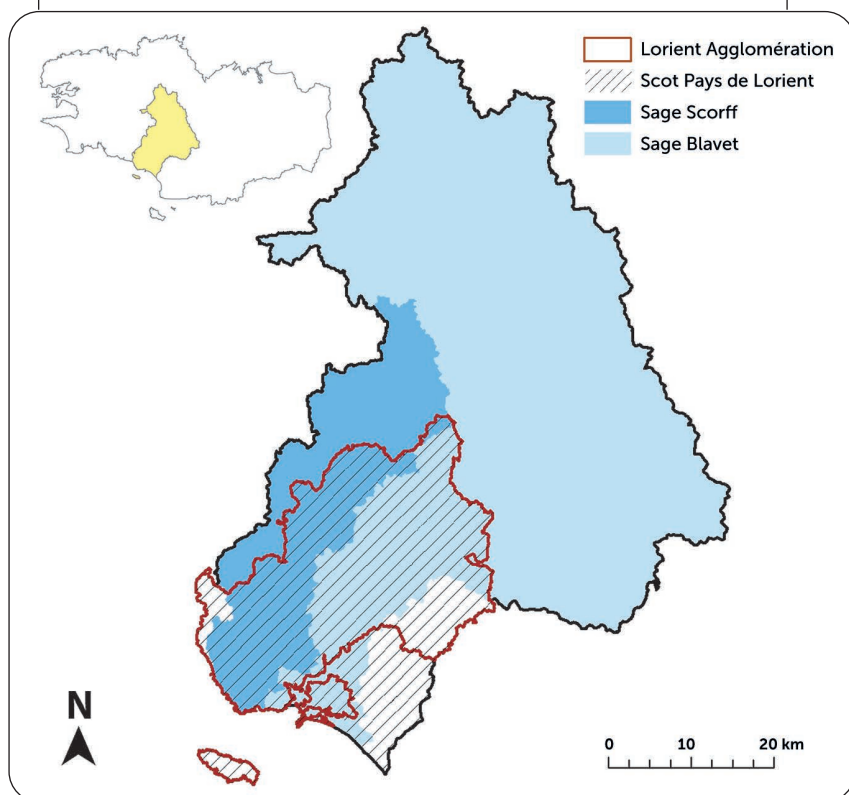
## L'échelle du bassin de vie : le Scot

À l'échelon hiérarchique inférieur, le schéma de cohérence territoriale (Scot) constitue un document d'urbanisme pivot et intégrateur, fixant les orientations fondamentales pour un certain nombre de politiques publiques au niveau supracommunal (à l'échelle d'une aire urbaine, d'un large bassin de vie, ou d'un bassin d'emploi). Le Scot dont dépend Lorient Agglomération englobe ainsi une zone géographique élargie au-delà des limites de l'intercommunalité elle-même — comprenant également l'intercommunalité limitrophe de Blavet-Bellevue-Océan. La couverture territoriale des Scot (et autres documents de planification urbaine) se retrouve ainsi en superposition avec les territoires dessinés par les outils de planification liés à l'eau (Sdage, Sage) (fig. 5.5).

Le Scot est destiné à servir de cadre de référence pour différentes politiques sectorielles d'aménagement du territoire, telles que celles centrées sur les questions de l'habitat, des transports, de l'environnement et du développement économique. Il vise à établir un projet de territoire à relativement long terme (environ 20 ans), anticipant les conséquences du changement climatique et les transitions démographiques, écologiques, énergétiques... Ce document a pour intérêt principal d'intégrer (soit *via* une prise en compte soit en étant en compatibilité avec) l'ensemble des normes d'échelons supérieurs, de manière à ce que les documents d'urbanisme d'échelons inférieurs n'aient à se référer qu'à lui. Ce jeu de hiérarchisation de la norme juridique permet ainsi d'inscrire les enjeux de l'eau et de la biodiversité aux enjeux économiques portés par les outils d'aménagement et d'urbanisme (le Scot devant être en compatibilité avec les objectifs des Sdage et Sage) (Barone, 2012).

85. <https://www.bretagne.bzh/actions/grands-projets/breizhcop/sraddet> (consulté le 18/08/2025).

**Figure 5.5.** Entremêlement de la couverture territoriale de documents de planification (Scot et Sage) dont dépend l'intercommunalité de Lorient Agglomération.



### L'échelle communale et intercommunale : PLU, PLUi, carte communale et permis de construire

À l'échelon inférieur, le plan local d'urbanisme (PLU) est un document d'urbanisme visant à construire un projet d'aménagement à l'échelle d'une commune ou d'un groupement de communes (PLUi). Devant être en compatibilité avec le Scot, ce document fixe des règles très opérationnelles pour encadrer l'aménagement. Il constitue le plan de référence pour l'octroi ou le refus des autorisations d'urbanisme. Il traduit aussi l'ensemble des orientations politiques des acteurs locaux en matière d'aménagement. De la même manière, la carte communale est un document d'urbanisme similaire, à destination des petites communes n'ayant pas élaboré de PLU. Il vise à délimiter les secteurs de la commune où les constructions sont autorisées et où la

commune pourra délivrer des autorisations de construire. L'autorisation finale de construire sera ensuite accordée *via* un permis de construire, devant lui-même être en conformité avec le PLU, PLUi ou la carte communale.

## ■ Pistes d'amélioration

En France, l'organisation actuelle semble — d'un point de vue théorique — plutôt bien répondre aux enjeux d'une gestion intégrée des ressources en eau. Pourtant, comme illustré tout au long de cet ouvrage, les multiples pressions sur la ressource en eau, ainsi que les conflits en résultant, suggèrent la persistance d'un certain nombre de lacunes (Hellier *et al.*, 2009). De nombreux travaux scientifiques se sont intéressés à cette question au cours des dernières décennies (Narcy, 2004 ; Barone, 2025) — contribuant au passage à faire évoluer la gestion de l'eau en France qui, bien qu'elle soit imparfaite, reste malgré tout relativement exemplaire en comparaison avec d'autres pays du monde.

Le travail de recherche ayant conduit à la réalisation de cet ouvrage s'est également penché sur cette question, à travers une étude publiée récemment (Ganivet *et al.*, 2024c), soulevant plusieurs lacunes dont :

- le maintien d'une organisation cloisonnée ;
- une division du travail qui délègue le lien avec le territoire à des bureaux d'études, alors que les agents gestionnaires sont essentiellement en relation avec les services de l'État pour instruire les procédures ;
- la prégnance de routines professionnelles qui freinent les évolutions ;
- et des textes réglementaires centrés sur la gestion de l'eau ou l'organisation des intercommunalités qui ne facilitent pas l'intégration de nouveaux acteurs au processus de décision, tout en réduisant le nombre d'acteurs compétents pour y prendre part.

Dans ce contexte, trois pistes d'amélioration (déjà évoquées en introduction de cet ouvrage) peuvent être proposées :

- mettre en place une gestion plus transversale ;
- mieux anticiper les pressions futures ;
- et favoriser une plus grande participation des acteurs locaux (en particulier de la société civile).

### Mettre en place une gestion plus transversale

Malgré de nombreuses évolutions positives, l'organisation actuelle reste encore relativement cloisonnée (en silo). Le maintien d'une organisation de la gestion en filières est souvent observé, avec des services dédiés au petit cycle de l'eau, d'autres au grand cycle de l'eau, d'autres à l'urbanisme... (Piquette et Wintz, 2009). Le tout perpétue un manque de transversalité pouvant s'illustrer, par exemple, par le fait d'ouvrir à l'urbanisation de nouvelles zones, sans se poser la question de la disponibilité en eau pour les alimenter. Pourtant, cet enjeu peut être inscrit au sein des documents de planification, à l'image du Scot du Pays de Lorient qui prescrit que : « Les PLU (ou le document

en tenant lieu), dans leur rapport de présentation, étudient les compatibilités des projets d'aménagement du territoire avec les capacités en eau potable afin d'assurer, en amont de l'ouverture à l'urbanisation, la bonne adéquation entre objectifs de développement résidentiel et touristique et besoins en eau potable » (Audélor, SMSCoT, 2018). Cependant, cette prescription n'est pas nécessairement prise en compte par les services des collectivités en charge de l'urbanisme. Ne disposant pas forcément d'outils permettant de s'assurer de cette « bonne adéquation », ceux-ci peuvent se contenter d'ouvrir à l'urbanisation le nombre d'hectares leur ayant été autorisés dans le Scot, considérant que cette réflexion a déjà été prise en compte à l'échelon supérieur.

Rappelons-le, en mars 2023, un rapport de la Cour des comptes relevait également « une organisation inadaptée aux enjeux de la gestion quantitative de l'eau » (Cour des comptes, 2023). Le rapport précise que, si l'État est là pour fixer le cadre législatif et réglementaire, son intervention manque de cohérence, se révélant même contradictoire en fonction des attentes des différents ministères (Agriculture, Environnement, Industrie, Santé, et Énergie). Mais surtout, le rapport pointe une décentralisation inachevée, où le transfert de compétences aux collectivités locales s'est traduit par un morcellement d'interventions trop souvent conduites à une échelle géographique inadaptée. En particulier, « il montre que l'efficacité de la politique de l'eau souffre de la complexité et du manque de lisibilité de son organisation, laquelle doit être structurée et clarifiée autour du périmètre des sous-bassins versants » — renvoyant, en partie, à un concept récemment proposé de « piège à complexité institutionnelle » (Bolognesi, 2022).

Si ce morcellement ne posait pas de problème majeur dans le cas d'une gestion du petit cycle de l'eau seul, il semble en revanche relativement inadapté à une approche plus systémique et transversale des enjeux de l'eau. Dans tous les cas, même si « l'organisation administrative du pays n'est pas seule responsable » (Cour des comptes, 2023), ces observations soulignent ainsi l'écart existant entre une ambition affichée d'approche cohérente et sa mise en œuvre concrète à l'échelle des territoires. Alors que le cadre législatif tend de plus en plus à favoriser une prise de compétences transversales (indispensable à une gestion durable des ressources en eau), on observe que l'administration locale peine à répondre à cet objectif. Les difficultés de lecture et d'application de ce nouveau cadre législatif et réglementaire traduisent ainsi un besoin d'accompagnement des collectivités territoriales pour cette prise de compétence — nécessitant de repenser le cadre de gestion des administrations, en instituant des espaces pour construire des transversalités (par exemple, à travers la mise en place plus systématique de routines de travail interservices). Cette mise en place d'approches plus transversales est d'ailleurs actuellement en cours d'initiation au sein de nombreuses collectivités.

### **Mieux anticiper les pressions futures**

L'organisation actuelle se traduit également par une faible prise en compte des pressions futures — et en particulier le changement climatique (Salles, 2022). Cela pourrait s'expliquer en partie par la nécessité de faire face à nombre d'enjeux à court terme

plus urgents — tels que l’approvisionnement en eau potable. Mais cette lacune découle également fortement de l’organisation administrative, et notamment du fait que les pressions climatiques ont été jusqu’alors trop peu prises en compte dans les différents outils de planification. À titre d’exemple, une des grandes orientations du Sdage Loire-Bretagne est d’« anticiper les effets du changement climatique par une gestion équilibrée et économe de la ressource en eau » (Comité de bassin Loire-Bretagne *et al.*, 2022). Néanmoins, l’intégration locale de cet enjeu (nécessairement très global et peu précis du fait de la superficie du bassin Loire-Bretagne) au sein des Sage est traduite par des prescriptions tout aussi peu précises. Ainsi, le Sage Blavet (bien qu’antérieur à l’actuel Sdage) indique seulement en préambule « qu’il est indispensable de veiller à une utilisation la plus durable possible de la ressource en eau et de promouvoir les économies d’eau, et ce d’autant que le changement climatique, dont on ne mesure pas précisément toutes les conséquences, nous oblige à anticiper l’avenir » (Sage Blavet, 2014).

De la même manière, à l’échelle de l’aménagement du territoire, le Scot du Pays de Lorient, dans son document « Diagnostic », ne mentionne le changement climatique que de manière brève et tout aussi peu précise : « Une politique d’économie d’eau est nécessaire afin de moins prélever dans les ressources d’eau et de les préserver. Si l’on ne connaît pas précisément l’impact local du réchauffement climatique planétaire en cours et prévu, il est indéniable qu’une augmentation de la température notamment en été ne peut qu’accroître cette vulnérabilité » (AudéLor, SMSCoT, 2018). À nouveau, la hiérarchie des normes renvoie ainsi la prise en compte de cet enjeu d’un outil à l’autre.

Néanmoins, cette faible prise en compte du changement climatique dans les documents locaux de planification découle aussi probablement de la difficulté de traiter d’un sujet aussi complexe et incertain. En effet, cela implique, pour les gestionnaires, d’avoir les moyens (au niveau prospective) permettant de quantifier les effets concrets du changement climatique à une échelle locale, c’est-à-dire de traduire des informations formulées à l’échelle nationale — voire mondiale — en effets tangibles à l’échelle locale. De nombreux outils sont maintenant disponibles pour aider les territoires à mieux se projeter sur l’état de la ressource en eau et sa répartition future (DRIAS<sup>86</sup>, Explore2<sup>86</sup>, Life Eau climat<sup>87</sup>...). Cependant, il s’agit d’approches relativement récentes, et souvent trop techniques pour que les gestionnaires se les approprient. Afin de réduire les incertitudes futures, certains territoires réussissent malgré tout à conduire des démarches de prospective « sur mesure » (Pays basque<sup>88</sup>, Grand Annecy<sup>89</sup>...). Il s’agit néanmoins d’un exercice coûteux, et seules les collectivités de tailles et ressources importantes (métropoles, agglomérations...) ont généralement les moyens de faire

86. <https://www.inrae.fr/actualites/explore2-life-eauclimat-cles-ladaption-gestion-leau> (consulté le 18/08/2025).

87. <https://www.gesteau.fr/life-eau-climat> (consulté le 18/08/2025).

88. <https://eau-grandsudouest.com/newsletters/une-etude-besoins-ressources-pays-basque-pour-attenuer-pression-changement-climatique> (consulté le 18/08/2025).

89. <https://www.sila.fr/nos-grands-projets/operation-quantifier-engages-pour-nos-ressources-en-eau> (consulté le 18/08/2025).

appel aux services de bureaux d'études spécialisés pour les mener à bien. Les territoires de plus petite envergure (en zones rurales notamment) n'ont, en revanche, généralement pas les ressources permettant de mettre en place ce type d'approche.

Outre les pressions climatiques, l'organisation actuelle manque également d'anticipation vis-à-vis des autres pressions anthropiques à l'échelle locale. À titre d'exemple, dans le document d'évaluation environnementale du Scot du Pays de Lorient, plusieurs hypothèses d'évolution démographique sont envisagées et traduites en besoins en logements, efforts de densification à faire, consommations d'eau, traitement des eaux usées et mobilité. Il est important de souligner l'intérêt de ce type d'outils qui, chose rare, permet une légère prospective à un horizon de 20 ans, ce qui n'est pas rien : « Sur la base de ces résultats, un scénario d'évolution démographique intermédiaire de + 0,5 % a été retenu par les élus locaux, soit l'accueil de 30 000 habitants supplémentaires à l'horizon 2037 » (Audélor, SMSCoT, 2018). Cependant, cette prospective légère montrait déjà que, dans le cas d'un accroissement supérieur, les besoins en eau n'étaient plus satisfaits par les prélèvements actuels. Se pose alors la question de savoir ce qu'il se passe après 2037 si la capacité d'accueil par rapport à la disponibilité en eau est déjà atteinte — d'autant que le Scot fait l'hypothèse d'une disponibilité de la ressource en eau constante, ne prenant donc pas en compte les pressions climatiques qui risquent de restreindre encore plus cette capacité d'accueil.

Il est pour cela essentiel que l'ensemble des acteurs des territoires, et en particulier les décideurs (politiques comme économiques), intègrent autant que possible les conséquences sociales et environnementales de leurs décisions (De Godoy Leski, 2021). Notamment, l'objectif est de passer d'une approche « curative » — c'est-à-dire visant à répondre à l'urgence ou à la crise uniquement — à une approche « préventive », dont le but est d'anticiper au mieux les changements à venir. Cela implique ainsi la mise en place d'études d'impact sérieuses en amont de tout aménagement d'envergure, de même que l'élaboration ou l'actualisation de nombreux documents de gestion afin d'intégrer les enjeux d'un monde qui change. Cela peut notamment s'appuyer sur divers outils existants, comme les analyses hydrologie-milieus-usage-climat (HMUC)<sup>90</sup> ou encore la mise en œuvre de PTGE<sup>91</sup>. Des outils facilitant l'appropriation des connaissances concernant les pressions futures sont également progressivement mis à disposition, dans le but de permettre à tout type d'acteurs locaux (et dans tout type de territoire) d'accéder plus facilement à ces informations : par exemple à travers l'outil AquaRepère actuellement développé par la Banque des territoires<sup>92</sup>, ou encore au sein des différents kits pédagogiques proposés dans le cadre du programme Aquagir<sup>93</sup>.

90. [https://www.gesteau.fr/sites/default/files/gesteau/content\\_files/document/Guide%20HMUC\\_VF4.pdf](https://www.gesteau.fr/sites/default/files/gesteau/content_files/document/Guide%20HMUC_VF4.pdf) (consulté le 18/08/2025).

91. <https://agriculture.gouv.fr/les-projets-de-territoire-pour-la-gestion-de-leau-ptge-au-service-dune-agriculture-durable> (consulté le 18/08/2025).

92. <https://aquarepere.banquedesterritoires.fr> (consulté le 18/08/2025).

93. <https://aquagir.fr> (consulté le 18/08/2025).



## Favoriser une plus grande participation des acteurs locaux

La dernière grande lacune identifiable au sein de la gestion actuelle concerne le manque d'intégration des points de vue des acteurs locaux (en particulier de la société civile) — alors même qu'il s'agit d'un prérequis de la gestion intégrée de l'eau. À nouveau, la logique technico-administrative de l'organisation actuelle influence également fortement les relations entre les types d'acteurs impliqués. Tout d'abord, cette gestion tend à impliquer principalement les acteurs institutionnels (élus et services intercommunaux, services déconcentrés et agences de l'État...), au détriment d'une démarche de concertation ou de co-construction qui inclurait usagers, gestionnaires et décideurs à tous les échelons.

Le cadre de la gestion de l'eau prévoit bien des instances de concertation entre différents collèges (élus, usagers, administration) — par exemple au sein des CLE, à l'échelle des différents Sage. Cependant, l'accès à ces instances de concertation reste relativement restreint pour la société civile (Massot *et al.*, 2021) — où seuls quelques représentants peuvent participer (c'est-à-dire principalement des acteurs associatifs). Qui plus est, il n'y a pas de CLE partout et, quand bien même, le pouvoir décisionnaire de ces instances reste limité — les décisions opérationnelles (en matière d'eau, d'aménagement du territoire, d'agriculture...) étant principalement mises en œuvre par les collectivités territoriales (et leurs groupements), puis par les services de la préfecture. À titre d'exemple, en 2017, les bureaux des CLE (Scorff et Blavet) avaient été sollicités pour donner un avis assorti de plusieurs recommandations sur le projet de révision du Scot du Pays de Lorient. Cependant, cette consultation était purement facultative et l'avis émis n'avait aucune obligation contraignante (en dehors de l'impératif de compatibilité avec les Sage). Ainsi, le rôle des CLE est principalement de fournir un cadre (à travers les orientations du Sage notamment) et un lieu d'échange et de débat autour des questions liées à la gestion locale de l'eau, mais, sauf exception, ce type de concertation n'existe pas aux échelles plus fines de prises de décision (Barbier *et al.*, 2022).

L'organisation actuelle tend également à réduire la participation des acteurs locaux principalement au processus réglementaire de l'enquête publique. Les limites de l'enquête publique, présentée par certains auteurs comme une « mise en scène par excellence du consentement » (Graber, 2022), ont déjà fait l'objet de nombreuses discussions. Si cette enquête traduit le cadre légal d'intégration des acteurs locaux aux décisions concernant un projet, elle constitue une des dernières étapes du processus, laissant peu de marge aux acteurs non institutionnels pour s'approprier le projet et pouvoir rendre un avis en toute connaissance de cause. Qui plus est, les textes réglementaires n'informent pas sur la manière dont l'administration doit consigner et tenir compte des avis. De ce fait, aux yeux de l'administration, l'enquête publique (et l'utilité publique de projets qu'elle vise à justifier), « ne renvoie pas à l'idée générale de bien commun [...] : c'est un principe au nom duquel il est juridiquement possible de transformer l'état du monde — y compris si certaines populations doivent

en subir les conséquences » (Graber, 2022). Ainsi, ce mode de participation, en tant que simple consultation, semble peu adapté à l'intégration des points de vue de l'ensemble des acteurs locaux.

Enfin, ce manque de participation peut également découler du mode de fonctionnement des intercommunalités qui, selon certains auteurs, tend à soustraire les débats à toute publicisation (Desage et Guéranger, 2011). Les décisions seraient, de cette manière, le fruit de négociations discrètes préalables, prenant forme dans des dispositifs destinés à éloigner l'éventualité du conflit politique — les délibérations plus ouvertes, auxquelles le public a accès (par exemple les conseils communautaires), ne faisant qu'entériner des décisions déjà prises en coulisses. Ce mode de fonctionnement traduit ainsi l'existence d'« espaces confinés de décision » (Gilbert et Henry, 2012) — un concept renvoyant au fait que certains acteurs débattent, négocient, s'accordent, réalisent des compromis entre eux par rapport à un problème ou un projet donné. Cette logique caractérise les modalités routinières d'appropriation des problèmes par les acteurs qui en ont la charge, leur mise en forme s'opérant ainsi habituellement au sein de groupes de spécialistes (élus et techniciens responsables du sujet), dans des espaces recevant une faible attention publique.

Cette manière de faire pourrait en partie découler de l'ancrage de la démocratie représentative dans les pratiques administratives françaises. Ce mode de fonctionnement suppose que les représentants et l'administration en général sont légitimes pour prendre des décisions et représenter l'intérêt général. Ce type d'approche conduit cependant à invisibiliser les espaces de décision pour de nombreux acteurs locaux, ce qui induit des tensions (conflits) sur le terrain qui, à terme, peuvent constituer un obstacle au déroulement de projets — là où la mise en place de démarches plus inclusives favoriserait certainement une meilleure compréhension collective des enjeux locaux. S'il est certain que cela n'empêchera pas systématiquement les conflits à l'avenir, cela semble cependant un prérequis pour espérer une transition socioécologique effective (et acceptable) à l'échelle locale. Pour cela, de nombreux dispositifs peuvent être expérimentés dans les territoires : par exemple à travers la mise en place de commissions consultatives des services publics locaux (CCSPL) — ayant pour vocation de permettre aux usagers d'obtenir des informations sur le fonctionnement des services publics, d'être consultés sur certaines mesures et d'émettre des propositions.

## Questionner la capacité d'accueil du territoire

L'accroissement démographique (local comme global) est l'un des facteurs les plus « évidents » expliquant les pressions humaines sur l'environnement. Au niveau global, la population humaine (qui est restée inférieure à 5 millions d'individus pendant plus de 90 % de l'histoire de l'humanité, et a mis des centaines de milliers d'années à atteindre 1 milliard, vers 1830) a atteint 2 milliards vers 1930 et a maintenant dépassé

les 8 milliards. En d'autres termes, en moins d'un siècle (c'est-à-dire en l'espace d'une vie humaine), 6 milliards d'êtres humains supplémentaires se sont ajoutés, quadruplant ainsi la population mondiale. Le taux de croissance de la population a culminé dans les années 1960 et a diminué depuis (environ 2,1 % contre moins de 1,1 % actuellement). Toutefois, en raison de l'augmentation de la population, cette diminution n'a pas réduit le nombre absolu de personnes qui s'ajoutent chaque année — environ 82 millions (United Nations, 2019). Pour cette raison, et contrairement aux idées reçues, ces tendances se poursuivent et les projections de 2024 des Nations unies prévoient, comme scénario médian, une augmentation de la population mondiale pendant encore 50 à 60 ans — atteignant un pic autour de 10,3 milliards dans la décennie 2080, avant de commencer à légèrement diminuer ensuite (United Nations, 2024). Par conséquent, les besoins de ressources et d'espace — indispensables afin de soutenir une population croissante — ont inévitablement entraîné des impacts environnementaux significatifs (Crist *et al.*, 2017 ; Maja et Ayano, 2021 ; Cafaro *et al.*, 2022).

D'un autre côté, les impacts de cet accroissement de la population humaine doivent également être mis en parallèle avec l'accroissement de la consommation par habitant — qui a suivi un schéma similaire, mais avec une accélération survenant encore plus récemment et avec une répartition beaucoup plus inégale entre les humains (Wiedmann *et al.*, 2020). À titre d'exemple, la moitié la plus pauvre de la population posséderait actuellement moins de 1 % de la richesse mondiale (Global Wealth Report, 2018). Dans le même ordre, il a été estimé que les 10 % les plus riches de la population produisaient presque autant d'émissions de gaz à effet de serre que les 90 % les plus pauvres (Lawrence *et al.*, 2013 ; Chancel et Piketty, 2017 ; Hubacek *et al.*, 2017 ; Chancel, 2022) — contribuant ainsi de façon disproportionnée à la multiplication des extrêmes climatiques dans le monde (Schöngart *et al.*, 2025). En 2008, il avait également été estimé que la consommation moyenne de matériaux et d'énergie par habitant dans les pays développés était supérieure à celle des pays en développement d'un facteur de 5 à 10 (Krausmann *et al.*, 2008). Les impacts environnementaux d'origine anthropique doivent ainsi être considérés dans le contexte des grandes inégalités économiques mondiales — les niveaux actuels d'utilisation de ressources et de pollutions soutenant principalement une partie de la population ayant des niveaux de vie élevés. Les différentes sociétés à travers le monde ont par-là contribué de manières inégales aux pressions exercées sur l'environnement et ne disposent pas des mêmes capacités pour modifier les trajectoires futures (Malm et Hornborg, 2014). En partie pour cette raison, le lien entre impacts environnementaux et accroissement démographique a été un sujet relativement controversé historiquement (Merchant, 2021). Une partie du débat repose sur l'affirmation que la croissance démographique est utilisée comme bouc émissaire permettant d'occulter les responsabilités d'une consommation excessive parmi les populations riches (Hughes *et al.*, 2023). Il est indéniable que la taille de la population humaine n'est pas le seul facteur ayant un impact sur l'environnement (au niveau local comme global), et que la consommation est une cause majeure (comme nous l'aborderons notamment dans la section « Adapter les modes de

vie »). Cela signifie-t-il pour autant qu'il s'agisse du seul facteur ? Et l'augmentation de la population devrait-elle être complètement mise de côté ? L'objectif de cet ouvrage n'est pas spécialement d'alimenter plus encore le débat concernant l'impact de la croissance démographique sur l'environnement, ce sujet ayant déjà été traité dans de nombreuses études (Meffe, 1994 ; Mora, 2014 ; Kopnina et Washington, 2016 ; Mehring *et al.*, 2020 ; Beebee, 2022). Il semblerait plutôt nécessaire de tenter de dépasser toute approche résolument binaire — accroissement de la population et consommation excessive étant deux facettes d'un même problème (Ganivet, 2020). En outre, il semble que le débat scientifique se soit plutôt concentré sur la question de savoir si la démographie devait être utilisée comme levier (solution), tandis qu'il semble y avoir un consensus identifiant à la fois démographie et consommation comme principaux moteurs de la dégradation de l'environnement (cause) (Ripple *et al.*, 2017 et 2019 ; IPBES, 2019 ; IPCC, 2022b). Néanmoins, au vu des polémiques que ce sujet peut parfois générer, il semblait important de justifier les raisons ayant conduit à l'aborder au sein de cet ouvrage. Partant de considérations globales, l'utilisation du levier démographique sera ensuite recentrée sur le contexte nous intéressant ici : l'échelle locale des territoires.

## ■ Le levier démographique à l'échelle mondiale

Bien que l'objectif de cet ouvrage concerne les leviers locaux d'adaptation, il semble important, dans un premier temps, d'aborder cette question de la démographie à l'échelle mondiale. Car même à une échelle locale, celle-ci peut en effet parfois être débattue, suscitant notamment un sentiment d'impuissance quant à la capacité à agir des acteurs locaux. Ainsi, il semble qu'une partie de la controverse — concernant l'utilisation de la démographie comme levier pour résoudre la crise environnementale à l'échelle mondiale — soit due au fait que les différents interlocuteurs n'abordent pas toujours la problématique sous le même angle. Premièrement, cela dépend de la pression à laquelle chacun s'intéresse. Récemment, il semble que le débat — du moins à destination du grand public — se soit beaucoup concentré sur le rôle de la croissance démographique mondiale sur le changement climatique (Pont, 2022). Mais comme indiqué précédemment, les émissions mondiales de gaz à effet de serre sont, pour beaucoup, le fait de populations aisées, faisant de l'accroissement démographique (qui se produit surtout dans des pays en développement) un facteur légèrement moins prédominant dans ce cas. En revanche, les impacts environnementaux ne se limitent pas aux seules émissions de gaz à effet de serre, et l'accroissement démographique reste un facteur essentiel lorsque l'on examine d'autres aspects des bouleversements environnementaux — en particulier les questions de changements de couverture et d'usages des sols, de prélèvements d'eau ou de perte de biodiversité (Crist *et al.*, 2017). Cela illustre à nouveau l'importance d'examiner les problématiques environnementales non pas séparément, mais dans une approche transversale.

En outre, cela dépend également de l'échelle de temps à laquelle les différents interlocuteurs s'intéressent. En raison d'une espérance de vie relativement longue, l'évolution de la population humaine se produit sur des temps longs. Par exemple, la combinaison des faibles taux de mortalité actuels avec un grand nombre de jeunes (nés lorsque les taux de fécondité étaient plus élevés), étant maintenant en âge de fonder une famille, conduira inévitablement à une augmentation de la population mondiale au cours des trente prochaines années, même avec des taux de fécondité faibles (Bradshaw et Brook, 2014). Selon le dernier rapport des Nations unies, c'est d'ailleurs ce phénomène qui sera responsable de la majorité (pour 79 %) de l'accroissement démographique mondial jusqu'au milieu du siècle (United Nations, 2024). Dans ce contexte, vis-à-vis d'objectifs à court/moyen terme (horizon 2030/2050) — tels que la réduction des émissions de gaz à effet de serre pour atteindre la neutralité carbone, ou la limitation de la consommation d'espace —, il est clair que des mesures acceptables (c'est-à-dire non coercitives et respectueuses des droits humains) en matière de démographie n'auraient qu'un impact limité sur cet horizon temporel. En d'autres termes, contrairement à une réduction de la consommation (sobriété), le levier démographique n'offre pas de solution rapide aux problèmes environnementaux. Ainsi, en dehors d'une augmentation de la mortalité entraînant la mort de milliards de personnes (ce qui n'est évidemment pas souhaitable), il est nécessaire de trouver des moyens de vivre dans un monde de 8 à 10 milliards d'habitants, ce qui, à ce stade, appelle nécessairement à des changements drastiques dans les modes de vie et de consommation.

En revanche, la question démographique mondiale reste un levier potentiellement intéressant sur des horizons à plus long terme (2050-2100). Par exemple, dans le cas d'un scénario de fécondité faible, les projections des Nations unies anticipent une diminution de la population mondiale à 6 milliards de personnes à l'horizon 2100 (contre 14 milliards dans un scénario de fécondité élevée). Évidemment, sur une période aussi longue, il n'est pas certain que la croissance démographique anticipée se produise, en particulier si l'on tient compte des potentielles conséquences sociales évoquées précédemment (Lafuite, 2017). En outre, il n'est pas certain que 6 milliards d'habitants puissent être plus durables que 14 milliards d'habitants si tout le monde adopte un niveau excessif de consommation. Il est néanmoins certain que l'impact de 6 milliards d'habitants serait beaucoup plus faible que celui de 14 milliards à consommation individuelle équivalente. Agir sur cette démographie mondiale va cependant bien au-delà du cadre d'action possible des acteurs locaux en France. Les avantages environnementaux devraient également être mis en balance avec les défis d'ordre social d'une telle transition démographique, tels que le vieillissement de la population (Bricker et Ibbitson, 2019) ou la faisabilité et l'acceptabilité des leviers à mettre en place (Engelman, 2016).

## ■ Le levier démographique à l'échelle locale

Bien que la question de la démographie à l'échelle mondiale soit intéressante, elle ne présente que peu d'intérêt dans le contexte de la gestion locale de l'eau à l'échelle française : ce n'est pas l'accroissement de population en Asie ou en Afrique (où se concentre la majeure partie de la croissance démographique mondiale) qui affectera significativement la disponibilité de l'eau en France (tout du moins directement). À ce sujet, il paraît d'ailleurs utile de rappeler que, dans le cas de l'eau circulant en France métropolitaine, sa quasi-intégralité prend sa source sur le territoire national. Le pays dispose donc du contrôle quasi intégral de l'eau disponible sur son territoire — ce qui est loin d'être le cas d'autres pays où la gestion de l'eau sur des bassins versants transfrontaliers génère des tensions entre États (par exemple pour le fleuve Colorado, le Nil ou encore le Jourdain).

En laissant donc de côté les questions d'accroissement démographique à l'échelle mondiale, il est malgré tout important d'également prendre en compte ce facteur à une échelle locale. En effet, l'augmentation de la population du fait de l'attractivité de certaines zones au détriment d'autres (par exemple l'hyperconcentration dans les métropoles ou zones côtières et touristiques) est un moteur majeur de la dégradation de l'environnement et de l'épuisement des ressources locales (eau douce, sols) (Colsaet *et al.*, 2018). Cette attractivité peut être motivée par différents facteurs, tels que des facteurs socio-économiques, sociopolitiques, environnementaux ou touristiques. Cependant, quelle qu'en soit la cause, l'augmentation locale de la population soulève la question de la capacité d'accueil de chaque territoire (approvisionnement en eau potable, assainissement, logements) et de la répartition géographique des populations (villes densément peuplées contre zones rurales dépeuplées).

Cette prise en considération est d'autant plus nécessaire qu'outre les aspects environnementaux, un accroissement de population au-delà de la capacité d'accueil d'un territoire donné peut aussi impacter fortement la société locale en elle-même. Tout d'abord, cette augmentation peut mener à une saturation des infrastructures (routes, transports en commun) et des services publics (santé, éducation), diminuant de fait la qualité de vie des résidents. En parallèle, une demande excessive en logements (qui n'est pas uniquement le fait de facteurs démographiques, mais questionne également la capacité d'accueil d'un point de vue économique) peut mener à une flambée des prix de l'immobilier, rendant difficile l'accès au logement pour une partie de la population. Cette question de capacité d'accueil est d'ailleurs au cœur des préoccupations dans de nombreux territoires, en particulier dans les zones les plus attractives, comme au Pays basque<sup>94</sup>, en Savoie<sup>95</sup> ou sur le littoral breton<sup>96</sup>.

94. [https://www.lemonde.fr/societe/article/2021/11/20/mobilisation-au-pays-basque-contre-la-hausse-des-prix-du-logement\\_6102969\\_3224.html](https://www.lemonde.fr/societe/article/2021/11/20/mobilisation-au-pays-basque-contre-la-hausse-des-prix-du-logement_6102969_3224.html) (consulté le 18/08/2025).

95. [https://www.lemonde.fr/argent/article/2024/02/10/l-immobilier-a-annecy-victime-de-son-succes\\_6215808\\_1657007.html](https://www.lemonde.fr/argent/article/2024/02/10/l-immobilier-a-annecy-victime-de-son-succes_6215808_1657007.html) (consulté le 18/08/2025).

96. <https://www.nouvelobs.com/immobilier/20210813.OBS47469/bretagne-quand-les-parisiens-raflent-l-immobilier.html> (consulté le 18/08/2025).

Questionner la capacité d'accueil d'un territoire (d'un point de vue résidentiel, touristique ou économique) est donc essentiel dans un objectif d'utilisation plus durable des ressources et de limitation des impacts environnementaux (Özdemir *et al.*, 2022). Cela permet également d'améliorer la qualité de vie des résidents, de promouvoir un développement économique plus équilibré et de mieux préparer le territoire aux changements futurs. Depuis quelques années, du fait de l'inadéquation entre objectifs de développement résidentiel et touristique et besoins en eau potable, ce type de solution a d'ailleurs commencé à être sérieusement considéré sur certains territoires (par exemple, en Suisse<sup>97</sup>, en Haute-Savoie<sup>98</sup> ou dans le Var<sup>99</sup>) — principalement à travers une restriction de l'ouverture des zones à bâtir<sup>100</sup>.

De la même manière qu'à l'échelle globale, cette solution doit néanmoins être pensée en parallèle d'autres aspects (économiques, sanitaires, sociaux...), car, comme toute solution, elle ne peut pas répondre seule à l'ensemble des enjeux et elle présente également un certain nombre de barrières sociales qu'il est nécessaire de prendre en compte. Par exemple, la production de logements (et donc l'étalement urbain en résultant) répond à la fois à une augmentation de la population locale (attractivité), mais aussi à un phénomène dit de « décohobitation » (c'est-à-dire le fait que les logements sont occupés par moins de personnes que par le passé), ainsi qu'à des facteurs économiques locaux (par exemple la construction de logements dans le but d'attirer de nouveaux habitants). Dans ce contexte, agir sur l'attractivité du territoire seule ne serait donc pas suffisant. Quoi qu'il en soit, intégrer cette analyse dans la planification territoriale permettrait en tout cas aux décideurs de mieux anticiper et répondre à certains défis actuels et futurs.

## Adapter les modes de vie

Comme identifiée tout au long de cet ouvrage, la question des ressources en eau touche à l'ensemble des aspects de nos modes de vie (se loger, se nourrir, se déplacer, se laver...), soit de manière directe (à travers nos usages de l'eau), soit de manière indirecte (à travers l'impact de nos choix de vie sur les changements de couverture et d'usage des sols, sur les émissions de gaz à effet de serre...). Leur préservation questionne ainsi directement nos modes de vie et de consommation à de nombreux niveaux.

97. <https://www.courrierinternational.com/article/environnement-face-au-manque-d-eau-un-village-suisse-limite-le-nombre-de-ses-habitants> (consulté le 18/08/2025).

98. <https://www.francebleu.fr/infos/societe/haute-savoie-plus-de-permis-de-construire-sur-rumilly-a-cause-du-risque-de-manque-d-eau-7567582> (consulté le 18/08/2025).

99. [https://www.francetvinfo.fr/replay-jt/france-3/12-13/secheresse-dans-le-var-des-communes-decident-de-suspendre-les-permis-de-construire\\_5675621.html](https://www.francetvinfo.fr/replay-jt/france-3/12-13/secheresse-dans-le-var-des-communes-decident-de-suspendre-les-permis-de-construire_5675621.html) (consulté le 18/08/2025).

100. <https://www.lesechos.fr/politique-societe/societe/les-permis-de-construire-commencent-desormais-a-etre-conditionnes-a-la-ressource-en-eau-2112916> (consulté le 18/08/2025).

Tout d'abord, face à une raréfaction des ressources disponibles, la première des priorités est de réduire au maximum les besoins<sup>101</sup>. En plus de la question de capacité d'accueil du territoire, la réduction des besoins en eau implique une sobriété des usages (Feuillette *et al.*, 2025). Cela concerne ainsi directement les usages domestiques (boire, se laver...) — aspect sur lequel tout le monde peut agir et qui touche de nombreux gestes du quotidien : prendre des douches plutôt que des bains, réduire la durée de ses douches, fermer le robinet en se brossant les dents ou en faisant la vaisselle... À titre d'exemple, cette consommation d'eau domestique s'élève actuellement, en moyenne en France, autour de 150 L par habitant par jour<sup>102</sup>, contre environ 100 L dans les années 1970<sup>103</sup>. Cela questionne également la multiplication des piscines individuelles (au détriment de piscines collectives) qui, en plus d'ajouter une pression supplémentaire sur l'eau potable lors de périodes de tension, peut avoir un effet cumulé non négligeable à l'échelle du bassin versant — agissant à la manière de milliers de petites retenues d'eau soumises à l'évaporation (Habets *et al.*, 2018).

Cela étant, la réduction des besoins en eau concerne beaucoup plus que nos seuls usages domestiques : cela questionne également notre modèle agricole et industriel et leurs usages de l'eau respectifs (irrigation, processus industriels...), et donc directement nos choix de consommation. Le problème est que, dans nos sociétés globalisées, les produits qui sont consommés proviennent majoritairement d'autres territoires (à l'échelle nationale et internationale). Cette remise en question de nos modes de consommation n'a ainsi pas nécessairement d'impact sur les usages locaux de l'eau, mais a pour but la préservation de la ressource à une échelle généralement bien plus large. Cette prise en compte plus large de l'eau que nous consommons réellement au quotidien — à travers non seulement nos usages domestiques (eau « visible »), mais également l'eau nécessaire à la fabrication des biens et services que nous utilisons (eau « invisible ») — est appelée « l'empreinte eau » (Hoekstra et Mekonnen, 2012). En moyenne, en France, en prenant en compte cette eau « invisible », notre consommation quotidienne réelle d'eau a plutôt été estimée autour de 4 000 L par habitant<sup>104</sup> — ce qui est considérablement plus élevé que notre seule consommation de 150 L d'eau « visible ».

À partir de ce constat, il apparaît très clair que les mesures individuelles (telles que la fermeture du robinet en se brossant les dents), même si elles restent nécessaires, ne représentent qu'une économie très marginale dans nos usages de l'eau. La préservation des ressources en eau passe donc majoritairement par une évolution de nos modes de vie et de consommation en matière d'alimentation (Vanham *et al.*, 2013 ; Mekonnen et Gerbens-Leenes, 2020), de transport (Hoekstra, 2015), d'habillement

101. [https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/07/17/face-a-la-rarefaction-de-la-ressource-en-eau-l-unique-solution-est-de-reduire-les-prelevements-estime-la-cour-des-comptes\\_6182385\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/07/17/face-a-la-rarefaction-de-la-ressource-en-eau-l-unique-solution-est-de-reduire-les-prelevements-estime-la-cour-des-comptes_6182385_3244.html) (consulté le 18/08/2025).

102. <https://www.services.eaufrance.fr/chiffres/2> (consulté le 18/08/2025).

103. <https://www.cieau.com/le-metier-de-leau/ressource-en-eau-eau-potable-eaux-usees/quels-sont-les-usages-domestiques-de-leau> (consulté le 18/08/2025).

104. <https://waterfamily.org/outil/eau-invisible> (consulté le 18/08/2025).



(Wang *et al.*, 2013), de numérique... De plus, ces modes de vie et de consommation ont également un impact indirect sur l'eau à travers les changements de couverture et d'usage des sols qu'ils génèrent. Par exemple, les attentes en matière de logement (maison individuelle, appartement, micromaison...), de transport (constructions d'autoroutes, de contournements routiers, de lignes à grande vitesse...) ou d'alimentation (transformation de zones naturelles en zones agricoles intensives) entraînent différents changements de couverture et d'usage des sols à l'échelle locale comme globale (et leurs conséquences sur le cycle de l'eau). Adapter nos modes de vie permet ainsi d'agir à la fois sur les besoins en eau, mais également sur la disponibilité de l'eau sur le territoire, en favorisant son stockage dans les sols et les nappes plutôt que son ruissellement en surface, sous l'effet de l'urbanisation et de l'agriculture intensive.

## Leviers économiques et incitations

Pour certains auteurs, l'économie peut être vue comme le principal moteur des bouleversements environnementaux (Parrique, 2019). Au cœur de tout le reste, l'économie est devenue le système social dominant tous les autres (Dulong, 1996). Si de nombreux systèmes économiques ont été utilisés par les sociétés humaines au cours de l'histoire, aujourd'hui, l'un d'entre eux s'est imposé dans nos sociétés mondialisées : le capitalisme. Ce système particulier se base, notamment, sur la propriété privée des moyens de production, une relation extractiviste avec la nature, le culte de la productivité et, surtout, un besoin de croissance économique (et donc de consommation) constante — ce qui, sur une planète et des territoires où l'espace et les ressources sont limités, semble par nature non durable (Jacques *et al.*, 2023 ; Otero *et al.*, 2020 ; IPBES, 2022). D'ailleurs, dès 1973, l'économiste et philosophe Kenneth E. Boulding prononçait devant le Congrès américain cette phrase devenue célèbre : « Celui qui croit qu'une croissance exponentielle peut continuer indéfiniment dans un monde fini est soit un fou, soit un économiste » (U.S. Congress, 1973).

Le capitalisme n'est cependant pas le seul modèle à blâmer, car d'autres systèmes économiques passés n'ont pas nécessairement évité les dégradations environnementales. Par exemple, l'environnement s'est également dégradé de manière significative pendant la période communiste (Shabad, 1979 ; Scrieciu et Stringer, 2008), comme l'illustre l'assèchement de la mer d'Aral, qui résulte majoritairement de l'expansion de l'irrigation ayant asséché ses deux principaux affluents (Micklin, 2007). Les gouvernements communistes ont généralement adopté l'idéologie marxiste sur les ressources naturelles (modifiée par la suite pour s'adapter à l'idéologie stalinienne et post-stalinienne), selon laquelle l'environnement n'a pas de valeur intrinsèque, mais doit servir les besoins humains (Mazurski, 1991). La dégradation de l'environnement et des ressources n'était pas une préoccupation majeure — au contraire, le communisme considérait surtout l'industrialisation comme un moteur d'abondance et de bien-être.

Quoi qu'il en soit, les arguments économiques et financiers jouent un rôle primordial dans les choix sociétaux aujourd'hui. Il semblerait ainsi judicieux de réfléchir à la manière dont le modèle économique contribuerait à l'atteinte de trajectoires plus durables (à l'échelle globale comme locale). S'il est certain qu'il n'existe pas de solution parfaite, avant de pouvoir faire un choix différent, il est en tout cas important de comprendre que le type d'économie que nous avons est lui-même un choix. À une échelle globale, d'autres systèmes économiques alternatifs ont ainsi été proposés et débattus, tels que l'économie circulaire (Stahel, 2016), l'économie bleue (Pauli, 2010), l'économie symbiotique (Delannoy, 2017), la théorie du *Donut* (Raworth, 2017) ou la décroissance (Parrique, 2019).

Bien entendu, remettre en question un modèle économique mondialisé implique des changements à des échelles bien plus larges que ce que permettraient des leviers locaux. En d'autres termes, il semble relativement illusoire d'espérer un changement complet de modèle à une échelle locale. L'enjeu serait donc plutôt d'identifier comment articuler au mieux le modèle existant afin de favoriser la résilience des territoires. Dans ce but, les incitations, telles que les taxes, les subventions et les dépenses publiques, peuvent être des leviers économiques influençant fortement les comportements à différentes échelles (individus, entreprises ou société) (Gneezy *et al.*, 2011). En France, par exemple, les subventions issues de la politique agricole commune (PAC) européenne ont été un facteur majeur de changement des pratiques agricoles sur la seconde moitié du <sup>xx</sup><sup>e</sup> siècle. À l'échelle locale, l'utilisation d'incitations pourrait ainsi être un puissant levier permettant de faire évoluer les comportements et orienter les territoires vers une trajectoire plus durable.

En particulier, jusqu'à présent, un des freins à la transition socioécologique est que la mise en place de pratiques plus vertueuses ne fait généralement pas l'objet d'une reconnaissance d'un point de vue économique. Cela peut notamment être illustré par l'exemple fictif d'un agriculteur, situé en amont d'un bassin versant, qui choisirait de préserver (voire de restaurer) du bocage et des zones humides sur son exploitation. Ce type de pratique fournirait ainsi un ensemble de services environnementaux dont tout le monde bénéficierait ensuite : préservation de l'eau en quantité et en qualité pour les usagers situés à l'aval du bassin versant, favorisation de la biodiversité, stockage du carbone... Cependant, alors que ce choix de pratique bénéficierait grandement au collectif, jusqu'à présent, il constituait surtout une perte nette pour l'agriculteur (moins de superficies exploitables pour la production, plus forte charge de travail du fait de l'entretien des haies...). Cet exemple peut aussi être transposé au cas, à nouveau fictif, d'un maire d'une commune, située également en amont d'un bassin versant, et qui déciderait de stopper toutes nouvelles constructions sur son territoire. De même que dans le cas de l'agriculteur, ce choix serait bénéfique pour la préservation des ressources en eau, pour la biodiversité ou pour le stockage du carbone, et donc très bénéfique collectivement à l'échelle du bassin versant. Cependant, pour le maire de la commune en question, moins de constructions signifierait certainement par ailleurs un déclin économique : à nouveau, celui qui met en place des pratiques plus durables est « perdant » économiquement.

Ainsi, le modèle actuel conduit surtout, selon l'adage, à privatiser les profits (extraction des ressources, usage des terres, construction de bâtiments...), tout en collectivisant les pertes (raréfaction des ressources en eau douce, dégradation et pollution des sols, impacts sur la santé...). S'il est certain que l'aspect financier n'est pas le seul facteur de changement (même sans contrepartie financière, beaucoup d'acteurs des territoires choisissent quand même de faire évoluer leurs pratiques), cela invite néanmoins à s'interroger sur le rôle que pourraient exercer des instruments économiques visant à récompenser les pratiques qui bénéficient au plus grand nombre. Ce questionnement s'insère ainsi au sein d'une réflexion plus large concernant la nécessité de repenser le fonctionnement de l'économie, notamment vis-à-vis des questions d'eau (Rockström *et al.*, 2023). Dans ce contexte, deux types d'instruments économiques permettant de répondre en partie à cet objectif seront présentés : la tarification incitative de l'eau, et les paiements pour services environnementaux.

## ■ Tarification incitative de l'eau

En France, la tarification de l'eau relève généralement du domaine de compétence des collectivités locales — dans le cas d'une gestion en régie — ou de structures privées (entreprises, opérateurs) — dans le cas d'une délégation de service public. La très grande majorité applique aujourd'hui un tarif en deux parties : une part fixe (correspondant à l'abonnement) et une part variable (correspondant au volume d'eau consommé). Cependant, dans cette part variable, le prix du mètre cube d'eau reste généralement constant, voire, dans certains cas (surtout historiquement, mais également actuellement dans certains territoires), le tarif est dégressif : plus il y a d'eau consommée, moins le prix du mètre cube est cher. Le problème qui se pose aujourd'hui est que ce système (et en particulier la dégressivité du tarif) n'incite guère à la sobriété des usages de l'eau. Aussi, depuis une dizaine d'années, de plus en plus de territoires choisissent de mettre en place une tarification incitative (ou progressive) de l'eau (Neverre *et al.*, 2010), c'est-à-dire que le prix de l'eau au mètre cube augmente par tranche : plus on consomme, plus le prix est cher. Généralement construits autour de trois ou quatre tranches, dans ce système, les premiers mètres cubes vitaux (pour boire, se laver...) sont ainsi facturés à un prix très modeste (voire sont gratuits), pour encourager les économies, tandis qu'au-delà, pour des usages « de confort », le prix est plus important, pour dissuader les consommations excessives.

Ce type de tarification, actuellement mis en œuvre dans un certain nombre de grandes villes (comme Rennes<sup>105</sup>, Dunkerque<sup>106</sup>, Niort<sup>107</sup> ou Montpellier<sup>108</sup>), s'est ainsi avéré assez

105. <https://www.eauidubassinrennais-collectivite.fr/votre-eau/prix-eau/tarification-sociale-ecologie-eau> (consulté le 18/08/2025).

106. <https://leaududunkerquois.fr/nos-valeurs> (consulté le 18/08/2025).

107. [https://www.eaux-du-vivier.fr/fileadmin/sev/documents/Usagers/facturation/Tarifs\\_2023\\_Secteur\\_SEV\\_-\\_Mauze\\_-\\_La\\_Foye.pdf](https://www.eaux-du-vivier.fr/fileadmin/sev/documents/Usagers/facturation/Tarifs_2023_Secteur_SEV_-_Mauze_-_La_Foye.pdf) (consulté le 18/08/2025).

108. <https://regiedeseaux.montpellier3m.fr/medias/pdf/tarification-eau-2023.pdf> (consulté le 18/08/2025).

efficace pour faire baisser les consommations d'eau (de l'ordre de 8 à 10 %) (Mayol, 2017), sans augmentation de facture d'eau, voire, dans certains cas, en permettant même des économies pour les ménages<sup>109</sup>. Pour cette raison, lors de la présentation de son « Plan eau » le 30 mars 2023<sup>110</sup>, le président Emmanuel Macron a annoncé souhaiter généraliser cette mesure à l'ensemble des territoires<sup>111</sup>. Cependant, cette solution peut également parfois s'accompagner d'effets non anticipés, comme d'inciter certains ménages à créer leurs propres forages (Mayol et Porcher, 2019). Il est donc essentiel de disposer en plus d'informations fines concernant les consommateurs, afin de déterminer les conséquences à long terme de la nouvelle tarification.

Cette tarification progressive questionne en outre le profil de certains ménages pouvant être catégorisés « gros consommateurs d'eau ». En effet, dans le cas de familles nombreuses, la consommation du ménage peut s'avérer élevée, quand bien même la consommation individuelle de chacun des membres de la famille serait assez basse. Par exemple, alors qu'une consommation annuelle de 50 m<sup>3</sup> n'est pas excessive pour un couple, cette même consommation serait en revanche très élevée dans le cas d'une personne célibataire, bien que bénéficiant du même tarif incitatif. Les tranches doivent donc être telles qu'elles n'impactent pas les usagers dont la consommation est normale, notamment les familles nombreuses. Afin de répondre à ce problème, certaines collectivités choisissent également de coupler cette tarification incitative à une tarification sociale : le prix de l'eau varie ainsi aussi en fonction des revenus des ménages, à travers la mise en place de mesures correctives (de compensation). À titre d'exemple, à Dunkerque, les ménages disposant de la Couverture maladie universelle complémentaire bénéficient automatiquement de réductions sur le prix de l'eau. Bien que ce ne soit pas le cas actuellement, cette tarification sociale pourrait également appliquer un tarif différencié suivant certains critères, tels que la distinction entre résidences principales et résidences secondaires, la présence de piscines individuelles...

Pour être efficace, cette mesure doit également s'accompagner d'une individualisation de la consommation. En effet, encore actuellement, un grand nombre de ménages n'ont pas accès à l'information concernant leur consommation réelle (compteurs collectifs, facture d'eau potable incluse dans les charges de copropriété...). Pour que la nouvelle tarification incite aux économies d'eau, il est donc essentiel qu'elle s'accompagne de l'installation d'équipements accessibles et clairs pour mesurer la consommation d'eau de chaque ménage. Enfin, cette mesure n'est pour l'instant envisagée que dans le cadre des usages liés à l'eau potable. Or, comme illustré plus haut dans la section « Les usages de l'eau », l'eau potable ne concerne qu'une petite partie de l'eau prélevée et consommée par les usages anthropiques. Ainsi, pour être réellement

109. <https://www.20minutes.fr/planete/4030496-20230331-plan-eau-tarification-progressive-plus-sobriete-vraiment-efficace> (consulté le 18/08/2025).

110. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/plan-daction-gestion-resiliente-concertee-leau> (consulté le 18/08/2025).

111. [https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/04/05/comment-fonctionne-la-tarification-progressive-de-l-eau-deja-experimentee-a-dunkerque-montpellier-et-libourne\\_6168274\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/04/05/comment-fonctionne-la-tarification-progressive-de-l-eau-deja-experimentee-a-dunkerque-montpellier-et-libourne_6168274_3244.html) (consulté le 18/08/2025).

efficace, il serait nécessaire d'également étendre ce type de mesure aux autres usages de l'eau (agriculture et industrie en particulier).

## ■ Paiements pour services environnementaux

Le concept de paiements pour services environnementaux (PSE) a progressivement émergé depuis les années 1990, suscitant un intérêt croissant à l'échelle mondiale (Wunder, 2005). En tant qu'instrument économique, il s'agit d'un mécanisme incitatif visant à encourager les pratiques favorables à la préservation de l'environnement, en rémunérant les individus ou les communautés pour les services environnementaux qu'ils fournissent (Engel *et al.*, 2008). Ces services peuvent inclure, par exemple, la séquestration du carbone, la préservation de la biodiversité, la gestion des ressources en eau ou la protection des paysages (Muradian *et al.*, 2010). Les expériences menées jusqu'à présent montrent ainsi que les PSE peuvent être des outils puissants pour la conservation environnementale et le développement durable, mais qu'ils nécessitent une conception soignée, une mise en œuvre adaptée au contexte local, une prise en compte et une implication des parties prenantes dès le début du processus, et un soutien continu pour réussir à long terme (Jack *et al.*, 2008).

En France, un certain nombre d'outils existants — tels que les mesures agroenvironnementales et climatiques (Maec) de la PAC<sup>112</sup> ou, depuis 2023, les écorégimes — proposent déjà en partie des incitations similaires aux PSE (Etrillard, 2015). Les MAEC visent en effet à encourager les agriculteurs à adopter des pratiques vertueuses pour l'environnement, en échange de paiements compensatoires. Cependant, l'évaluation de ces mesures laisse apparaître un bilan assez mitigé. En particulier, les Maec reposent généralement sur une obligation de moyens, sans contrôle des résultats obtenus — conduisant parfois les exploitants à peu modifier leurs pratiques. De plus, l'approche retenue pour le calcul des paiements n'est pas une véritable rémunération du service, mais uniquement une compensation des surcoûts. Également, ces subventions, provenant d'un dispositif économique externe au territoire (la PAC européenne), font généralement appel à des démarches administratives souvent complexes et assez lentes. Sous cette forme, ces contraintes constituent donc un frein à la mise en place de ce type de mesures : elles sont peu attractives pour les exploitants (Dupraz et Pech, 2007).

Afin de gagner en efficacité (et en durabilité), il semble ainsi nécessaire que ce type d'instrument économique soit piloté à une échelle plus locale. Tout l'enjeu serait de permettre à l'économie locale d'être un moteur de l'atteinte d'une trajectoire plus durable pour les territoires (par exemple sans dépendre de la PAC). Dans le domaine de l'eau, une manière de faire pourrait ainsi être de s'appuyer directement sur les structures en charge de la gestion locale de l'eau (qu'il s'agisse d'organismes publics ou privés).

112. <https://agriculture.gouv.fr/maec-les-nouvelles-mesures-agro-environnementales-et-climatiques-de-la-pac> (consulté le 18/08/2025).

Un exemple emblématique de ce type de démarches concerne le programme de PSE pour la protection de l'eau potable de la ville de New York (États-Unis) (Laurans *et al.*, 2011). Dans les années 1990, faisant face à une problématique de qualité d'eau, la collectivité a fait le choix d'opter pour une approche de PSE. Elle a donc investi dans la protection des bassins versants qui fournissent de l'eau potable à la ville (dans les Catskills et les montagnes de la région de la rivière Delaware), plutôt que d'investir dans des infrastructures de traitement coûteuses (dont la construction était estimée à plus de 6 milliards de dollars et les coûts annuels d'exploitation entre 150 et 300 millions) (Daily et Ellison, 2002). Le programme mis en place permet ainsi, grâce à une taxe intégrée à la facture d'eau des usagers, de rémunérer les agriculteurs (situés au niveau des bassins versants concernés) pour des actions de prévention des pollutions. La ville a pu de cette manière garantir une eau de haute qualité, tout en favorisant la conservation et le développement économique local. Une approche similaire a également été mise en place par la ville de Munich (Allemagne), dont l'eau potable provient des Préalpes où l'activité agricole est aussi source de pollution (Grolleau et McCann, 2012).

En France, de nombreuses approches similaires ont été expérimentées. Notamment, à partir des années 1990, Nestlé Waters a été à l'origine de la première initiative de PSE (Hernandez et Benoît, 2011) — à travers une contractualisation avec des exploitations agricoles dans le but de préserver la qualité des eaux souterraines de Vittel (Depres *et al.*, 2008). Plus récemment, des dispositifs expérimentaux de PSE ont continué de se déployer en France, notamment poussés au niveau national par le plan Biodiversité de 2018, où une démarche de PSE a été élaborée par le ministère chargé de la Transition écologique et ensuite déployée par les agences de l'Eau à partir de 2020<sup>113</sup>. Dans la continuité des exemples déjà présentés, cette démarche de PSE vise à rémunérer les pratiques des agriculteurs ayant des impacts positifs sur l'environnement, en particulier sur l'eau (mais également la biodiversité et les sols), et inscrites dans des projets de territoire portés, le plus souvent, par des collectivités locales<sup>114</sup>. Depuis 2020, Eau de Paris s'est également lancé dans l'expérimentation de ce type de dispositif sur son territoire, dans le but de préserver la qualité des ressources en eau<sup>115</sup>.

Il semble néanmoins opportun de mentionner que tous ces exemples de PSE sont principalement orientés sur le volet « qualité de l'eau ». Pourtant, les mesures à mettre en place vis-à-vis des enjeux quantitatifs sont sensiblement identiques (préservation et restauration des zones humides, des haies...). De plus, ces exemples visent quasi exclusivement à faire le lien entre eau et agriculture, alors même que de nombreux autres usages des sols pourraient être concernés sur les territoires — en particulier

113. <https://pse-environnement.developpement-durable.gouv.fr> (consulté le 18/08/2025).

114. <https://agriculture.gouv.fr/les-paiements-pour-services-environnementaux-en-agriculture> (consulté le 18/08/2025).

115. <https://www.eaudeparis.fr/actualite/C3%AgS/un-dispositif-unique-pour-accompagner-les-agriculteurs-vers-une-transition-durable> (consulté le 18/08/2025).

la forêt, considérant son importance pour la préservation de l'eau (en quantité et en qualité)<sup>116</sup>. Une rare expérience de PSE faisant le lien entre eau potable et gestion forestière peut toutefois être citée. Dans le cadre du projet Interreg Alpeau<sup>117</sup>, l'Association syndicale libre forestière du mont Forchat<sup>118</sup> fut créée afin de permettre le rapprochement entre gestionnaires chargés de l'eau potable (le Syndicat intercommunal des eaux des moises, puis le Syndicat des eaux des moises et voirons, et désormais Thonon Agglomération) et propriétaires de forêts situées dans les zones de captage. L'objectif de cette démarche était ainsi de concilier gestion forestière et préservation des ressources en eau — les propriétaires forestiers s'engageant à respecter un cahier des charges strict (prélèvements de faible ampleur, protection des sols...) contre un soutien financier apporté par la collectivité en charge de la production d'eau potable. Au final, en France, cette approche par les PSE à une échelle locale en est ainsi à ses débuts, mais présente un certain potentiel, avec l'émergence continue de nouvelles expérimentations sur de nombreux territoires et sous différentes formes.

## Sensibiliser aux enjeux de l'eau

De nombreux facteurs sociaux et culturels affectent fortement les activités humaines — en influençant notamment les préférences individuelles dans de nombreux domaines (logement, alimentation, transports...) (Reckien *et al.*, 2011 ; Reckien et Luedeke, 2014). Notre niveau d'exigence, ainsi que ce que la société considère aujourd'hui comme « normal » (les voyages longue distance, la surconsommation de produits...) ont considérablement augmenté au cours des dernières décennies. Mais même à revenus et niveaux de vie équivalents, les impacts environnementaux peuvent différer en fonction des préférences de la population et de différences culturelles. Cela peut notamment s'illustrer par la différence de consommation et d'émissions par habitant observée entre l'Europe de l'Ouest et les États-Unis, alors que les conditions de vie sont sensiblement équivalentes.

De plus, les pressions exercées sur l'environnement peuvent dépendre des types de « vision du monde » (ou paradigme) au sein de chaque société. En effet, indépendamment des systèmes économiques, une vision du monde prédomine dans les sociétés humaines modernes : l'anthropocentrisme — ne considérant la nature que comme une ressource utilisable par l'humanité (Crist, 2012). Suivant une telle vision du monde, l'humanité peut construire une société sans se soucier des limites naturelles, comme l'affirmait dès 1794 Condorcet le philosophe des Lumières : « La nature n'a mis aucun terme à nos espérances » (Caritat, 1970). Pourtant, d'autres visions du monde sont possibles,

116. [https://reseau-eau.educagri.fr/files/fichierRessource1\\_brochure\\_foret\\_eau\\_potable\\_oct12.pdf](https://reseau-eau.educagri.fr/files/fichierRessource1_brochure_foret_eau_potable_oct12.pdf) (consulté le 18/08/2025).

117. <https://www.alpeau.org/images/GuideAlpeau.pdf> (consulté le 18/08/2025).

118. <https://www.aslf.fr> (consulté le 18/08/2025).

comme « l'écocentrisme » ou « l'écologie profonde », selon lesquelles toutes les entités naturelles (c'est-à-dire les humains et les non-humains, les écosystèmes et les processus écosystémiques) (Barbier et Trépos, 2007) sont considérées comme ayant une valeur intrinsèque et dignes de respect (Batavia et Nelson, 2017 ; Washington, 2018). Par conséquent, la façon dont nous percevons l'environnement est très certainement un autre facteur à la base de nos impacts sur le système naturel (Washington *et al.*, 2017).

Cependant, ces évolutions dans les modes de vie, de gestion et d'organisation, ainsi que dans les rapports à la nature, impliquent de profonds changements sociaux et culturels (que ce soit à l'échelle nationale ou à l'échelle locale). La mise en place de solutions adaptées nécessite également une bonne compréhension des enjeux sur le territoire auprès du plus grand nombre, dans le but d'impliquer tout le monde dans une trajectoire plus résiliente. En effet, pour accepter le changement, il est indispensable de comprendre le problème<sup>119</sup>. Tout le monde n'ayant pas forcément la possibilité de se former à ces enjeux, il est alors nécessaire de mettre en place des actions de sensibilisation et de communication à destination de tous les publics possibles (élus, techniciens, scolaires, particuliers, professionnels...). L'intérêt de ce type d'approches est de pouvoir également partager les initiatives et démarches alternatives existantes (guide d'économie d'eau, réseaux d'agriculture de proximité, retours d'expériences...). De nombreuses méthodes sont ainsi possibles et doivent être adaptées à l'objectif et au public visé. Cela peut, par exemple, se présenter sous forme d'organisation de journées de présentation et d'information (journées thématiques, expositions...), de communication à l'aide de réseaux sociaux ou de médias (lettres d'information, flyers, panneaux pédagogiques, articles de presse...), ou encore d'ateliers participatifs — à l'image de Trajectoire eau et territoire (qui sera présenté à la fin de cet ouvrage) ou d'outils similaires (comme les approches de la famille « Wat-a-game » ; Ferrand *et al.*, 2021).

119. [https://www.lemonde.fr/idees/article/2024/04/08/le-deni-francais-face-aux-menaces-sur-l-eau\\_6226651\\_3232.html](https://www.lemonde.fr/idees/article/2024/04/08/le-deni-francais-face-aux-menaces-sur-l-eau_6226651_3232.html) (consulté le 18/08/2025).



## 6. Solutions fondées sur la nature

S'inscrivant dans la continuité de travaux sur les services écosystémiques de la fin des années 1990 et du début des années 2000 (Daily, 1997 ; MEA, 2003), le concept de « Solutions fondées sur la nature » (SFN) a été initialement introduit par la Banque mondiale en 2008, puis popularisé par l'Union internationale pour la conservation de la nature (IUCN) à partir de 2009 (MacKinnon *et al.*, 2008 ; IUCN, 2009). Cette catégorie regroupe un ensemble de solutions s'appuyant sur les processus et les écosystèmes naturels pour relever divers défis environnementaux, sociaux et économiques (Cohen-Shacham *et al.*, 2016), fournissant même une efficacité supérieure par rapport aux solutions techniques traditionnelles (Keesstra *et al.*, 2018). Ces solutions cherchent à protéger, gérer durablement et restaurer les écosystèmes naturels, tout en procurant des bénéfices à la fois pour le bien-être humain et pour la biodiversité. Ainsi, de nombreuses initiatives et projets à travers le monde utilisent des SFN pour aborder des problèmes allant de la sécurité alimentaire à la gestion de l'eau, en passant par la résilience urbaine (Eggermont *et al.*, 2015 ; Nesshöver *et al.*, 2017).

Il est néanmoins important de souligner que, si le terme SFN semble particulièrement « à la mode » depuis quelques années (surtout dans les arènes politiques), il renvoie généralement à un ensemble d'approches connues et utilisées (par des acteurs de terrain notamment) depuis déjà bien longtemps, mais portant d'autres terminologies (Seddon *et al.*, 2020). Plus qu'une nouveauté, le terme SFN peut ainsi être considéré comme un concept « parapluie » englobant un grand nombre d'approches « basées sur la nature » déjà établies ou émergentes (comme la restauration écologique, l'agroécologie, l'ingénierie écologique, l'hydrologie régénérative<sup>120</sup>, l'approche écosystémique...) (Seddon *et al.*, 2021). Il s'agit donc plus d'un objet politique formant la dernière contribution à la famille des concepts « verts » — de la même manière que les concepts de « développement durable » et de « biodiversité » avaient émergé avant lui (*Nature* [éditorial], 2017). Si le concept semble avoir un certain engouement à l'échelle internationale et nationale (ministères, agences de l'Eau...), il peine cependant encore à se concrétiser à l'échelle des territoires (Drapier *et al.*, 2024). Ces solutions présentent néanmoins un levier majeur d'adaptation des territoires face aux risques liés à l'eau (sécheresses et inondations tout particulièrement) (IUCN Comité français, 2019).

L'objectif de ce développement est ainsi de donner un aperçu de certaines SFN et leur utilisation en réponse aux risques liés à l'eau. Cependant, du fait de son caractère relativement récent, le concept de SFN ne s'interprète et ne s'utilise pas toujours

120. <https://hydrologie-regenerative.fr/#definition> (consulté le 18/08/2025).

exactement de la même manière suivant les interlocuteurs (Hanson *et al.*, 2020). Notamment, la manière dont ces solutions bénéficient à la fois au bien-être humain et à la biodiversité peut être sujette à débat. Aussi, certaines des solutions présentées ci-après peuvent, selon les points de vue, ne pas forcément appartenir à la catégorie des SFN. Dans le contexte de cet ouvrage, le choix a été fait de rassembler, au sein de cette catégorie, l'ensemble des solutions s'appuyant sur les processus naturels des écosystèmes (c'est-à-dire n'utilisant pas d'infrastructures lourdes), même dans le cas où les bénéfices pour la biodiversité seraient relativement faibles (mais pas absents pour autant).

Après les solutions sociales et politiques, ces SFN constituent le second levier d'adaptation à envisager à l'échelle des territoires, dans le but d'optimiser la disponibilité locale de l'eau tout en s'appuyant sur les processus naturels — bénéficiant ainsi également à la biodiversité (ce qui n'est généralement pas le cas de solutions techniques et technologiques). En particulier, atténuer les effets du changement climatique implique non seulement une réduction des émissions de gaz à effet de serre, mais également des modifications dans les patrons de changements de couverture et d'usage des sols, afin de prendre en compte le rôle qu'ils jouent dans l'altération du cycle hydrologique (Bonan, 2008). Une récente publication du programme des Nations unies pour l'environnement mettait ainsi en avant la nécessité de « Travailler avec les plantes, les sols et l'eau pour refroidir le climat et réhydrater les paysages de la Terre » (Schwarzer, 2021).

Dans ce contexte, l'intégralité des solutions présentées dans cette catégorie vise à agir sur l'occupation et l'usage des sols ou l'aménagement des cours d'eau, afin de réduire le ruissellement de l'eau et de favoriser son infiltration (permettant ensuite son stockage dans les sols et les nappes) — atténuant à la fois les risques d'inondations (réduction des pics de crues) et de sécheresses (l'eau stockée dans les sols et les nappes alimentant ensuite le bassin versant lors des périodes plus sèches). Au final, cette régénération du cycle de l'eau par l'aménagement du territoire passe donc par l'adaptation de l'urbanisation et de l'agriculture, ainsi que par la conservation et la restauration des écosystèmes.

Il convient néanmoins de préciser que les leviers d'action proposés ici sont évalués avant tout au regard de leurs bénéfices sur le cycle de l'eau (et la biodiversité). Ils ne tiennent en revanche pas compte des nombreuses contraintes d'ordre social (notamment économiques, politiques...) qu'il est également nécessaire de considérer à l'échelle des territoires. Pour cette raison, la mise en œuvre de SFN nécessitera souvent d'être couplée à certaines solutions sociales et politiques évoquées précédemment (réglementation, PSE...) — confortant à nouveau le besoin d'aborder ces catégories de solutions de façon complémentaire. Il ne s'agit également pas de solutions miracles permettant de pallier tous les extrêmes : bien qu'elles puissent être efficaces sur des événements de faible intensité, leur effet restera limité sur les événements les plus intenses (l'adaptabilité des territoires devenant limitée au-delà de certains seuils).

## Adaptation de l'urbanisation

Cette section s'attache à présenter un ensemble de solutions visant à limiter l'impact de l'artificialisation des sols (sous l'effet de l'urbanisation) sur le cycle de l'eau. Bien que, pour certains, ce type de solutions ne soit pas considéré comme des « Solutions fondées sur la nature » (car ne se basant pas sur la restauration d'écosystèmes), leurs bénéfices pour la biodiversité semblent pourtant leur permettre d'être tout à fait considérées comme telles.

### **■ Limiter la consommation d'espace**

Comme illustré précédemment, l'étalement urbain (et l'imperméabilisation des sols qui en résulte) est une cause majeure d'augmentation des risques d'inondation, tout en contribuant à assécher les bassins versants (du fait de la réduction de la recharge des eaux souterraines). Limiter la consommation d'espace est donc un enjeu majeur à l'échelle des territoires, afin de maintenir la possibilité pour les eaux pluviales de s'infiltrer. Cette mesure est particulièrement importante, non seulement vis-à-vis des risques liés à l'eau, mais également vis-à-vis des questions de biodiversité et de sécurité alimentaire<sup>121</sup>. En effet, outre le fait de se faire au détriment d'espaces naturels et forestiers (une des causes majeures de perte de biodiversité) (IPBES, 2019), cette consommation d'espace se fait également principalement au détriment de zones agricoles. Les pertes que cela génère risquent, à long terme, de réduire encore plus la capacité des terres agricoles à nous nourrir (l'urbanisation se faisant souvent en plaine, dans les zones les plus fertiles), alors même que la situation d'autonomie alimentaire de la France est déjà déclinante (Lambert, 2022 ; FranceAgriMer, 2023).

Bien entendu, étant donné les contraintes qu'une telle limitation de la consommation d'espace peut poser aux territoires, il est indispensable de l'envisager en complémentarité avec les solutions sociales et politiques évoquées précédemment. Par exemple, sa mise en œuvre questionne également d'autres leviers sociaux (capacité d'accueil, mode de vie...), dans la mesure où cette réduction nécessitera généralement une densification urbaine. De plus, elle peut aussi s'appuyer, au niveau national, sur la loi Climat et résilience du 22 août 2021 qui a posé un objectif de « Zéro artificialisation nette » (ZAN) à l'horizon de 2050<sup>122</sup>. Cette loi a également fixé un objectif intermédiaire de réduction par deux de la consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers d'ici 2030, par rapport à la période de référence 2011-2020. À terme, l'objectif de cette loi est que l'artificialisation des sols soit réduite au maximum et, dans le cas où elle soit malgré tout nécessaire, qu'elle soit compensée par une renaturation à proportion égale d'espaces artificialisés (« Tout ce qui sera pris sur la nature

121. <https://www.vie-publique.fr/eclairage/286021-securite-alimentaire-un-enjeu-international-renforce> (consulté le 18/08/2025).

122. <https://www.vie-publique.fr/eclairage/287326-zero-artificialisation-nette-zan-comment-protoger-les-sols> (consulté le 18/08/2025).

devra être rendu »). De nombreuses réflexions sont en cours sur les territoires afin d'étudier les trajectoires permettant d'atteindre les objectifs de cette loi, comme une étude expérimentale menée en 2024 en Région Bretagne<sup>123</sup>. Malgré les difficultés d'application<sup>124,125</sup> et la réticence de certains territoires, la limitation de consommation d'espace reste néanmoins une des mesures essentielles à mettre en œuvre pour s'adapter aux changements en cours.

## ■ Rendre les villes plus perméables

En parallèle d'une limitation de la consommation d'espace, le concept de « ville perméable » (ou « ville éponge ») (Zevenbergen *et al.*, 2018) est une approche de l'aménagement urbain qui vise à améliorer la gestion des eaux pluviales. Lorsque l'urbanisation est impossible à éviter, il s'agit de concevoir les villes de manière à permettre une infiltration maximale des eaux de pluie dans le sol (on parle de gestion des eaux de pluie « à la parcelle »), en réduisant le ruissellement de surface et en favorisant la recharge des nappes souterraines.

Ce concept de ville perméable s'appuie sur plusieurs principes. Tout d'abord, il vise à l'utilisation de revêtements perméables (bitume perméable, pavés joints enherbés, bandes enherbées/fleuries, platelage en bois...), afin de permettre de concilier à la fois les usages, la sécurité et le confort des usagers, avec les fonctions de perméabilisation (infiltration de l'eau de pluie dans le sol plutôt que son écoulement vers les réseaux). Ensuite, il vise à l'intégration, autant que possible, d'espaces verts qui absorbent et retiennent l'eau de pluie, tels que les parcs, les jardins pluviaux, les toitures végétalisées (Berndtsson, 2010), les bandes végétalisées, les bassins et fossés (noues) d'infiltration (Ekka *et al.*, 2021). Bien entendu, ces aménagements impliquent également que le sol sous-jacent soit en mesure de permettre à l'eau de s'infiltrer.

Quoi qu'il en soit, ces deux actions peuvent être réalisées sur de nouvelles surfaces à urbaniser, ou bien en remplacement de surfaces existantes (comme la désimperméabilisation et la végétalisation de cours d'école<sup>126</sup>). En parallèle, ces mesures doivent être accompagnées d'une réduction de la dépendance aux systèmes de drainage conventionnels au profit de mesures mentionnées précédemment. Au final, ces mesures présentent non seulement des bénéfices vis-à-vis des risques liés à l'eau, mais permettent aussi de favoriser la biodiversité urbaine, tout en réduisant la vulnérabilité des villes aux problématiques d'îlots de chaleur urbains en cas de canicule (Susca *et al.*, 2009). Cette approche réduit ainsi non seulement les risques

123. <https://www.bretagne.developpement-durable.gouv.fr/etude-experimentale-zero-artificialisation-nette-a5575.html> (consulté le 18/08/2025).

124. <https://www.mairesdefrance.com/zan-les-difficultes-d-application-demeurent-article-2709-o> (consulté le 18/08/2025).

125. <https://www.vie-publique.fr/loi/297753-assouplissement-zan-artificialisation-sols-proposition-de-loi-trace> (consulté le 18/08/2025).

126. <https://www.cerema.fr/fr/actualites/pourquoi-comment-vegetaliser-cours-ecole> (consulté le 18/08/2025).

d'inondation et de sécheresse, mais elle contribue également à améliorer la qualité de l'eau et la qualité de vie urbaine, tout en augmentant la résilience urbaine face aux changements climatiques.

## **Préservation et restauration des écosystèmes**

Cette section s'attache à identifier un ensemble de solutions permettant de réduire l'impact des activités humaines sur le cycle hydrologique à travers la préservation et la restauration des écosystèmes.

### **■ Préserver les zones d'expansion de crue et les plaines inondables**

Les zones d'expansion de crue, également appelées plaines inondables (*floodplains* en anglais), sont d'une importance capitale dans la régulation du cycle hydrologique à l'échelle des bassins versants (Opperman *et al.*, 2017). Tout d'abord, ces zones agissent comme des tampons naturels qui absorbent et retiennent l'eau des crues, réduisant ainsi l'ampleur et l'intensité des inondations en aval. Simultanément, l'eau des crues retenue dans ces zones peut ensuite avoir le temps de s'infiltrer dans le sol, permettant la recharge des nappes souterraines et donc le stockage de l'eau pour les périodes plus sèches. Ces zones abritent également une grande variété d'espèces végétales et animales, certaines étant spécifiques à ces milieux humides. La préservation des zones d'expansion de crue contribue donc à limiter les risques de sécheresse et d'inondation à l'échelle du bassin versant, tout en favorisant la conservation de la biodiversité. En plus de la conservation de zones d'expansion de crues intactes, il est également intéressant, là où c'est encore possible (dans les secteurs peu vulnérables), de restaurer d'anciennes plaines inondables et de les reconnecter avec leur cours d'eau (Hobbs et Harris, 2001). Cela peut nécessiter un ensemble de travaux de génie écologique, tels qu'abaissement de rive, suppression de digues, restauration de ripisylve (formations arborées se développant sur les bords des cours d'eau<sup>127</sup>), reprofilage des berges et du lit...

### **■ Préserver les zones humides**

Les zones humides (qui font également parfois office de zones d'expansion de crue) constituent un autre type d'écosystème dont le rôle sur le cycle hydrologique est majeur (Bullock et Acreman, 2003). Tout d'abord, elles sont comme des éponges naturelles, absorbant et stockant de grandes quantités d'eau issue des précipitations, des crues et des eaux souterraines (Mitsch et Gosselink, 2015). Leur présence

127. <https://glossaire.eauetbiodiversite.fr/concept/ripisylve> (consulté le 18/08/2025).

aide ainsi à réguler les débits des cours d'eau et à atténuer les inondations, en libérant l'eau lentement dans les rivières et les ruisseaux. Cela permet ensuite d'atténuer les sécheresses en soutenant les étiages lorsque l'eau manque. Les zones humides facilitent également l'infiltration de l'eau dans le sol, contribuant ainsi à la recharge des nappes souterraines. En outre, les processus biologiques et chimiques en leur sein améliorent la qualité de l'eau : ce sont de véritables filtres naturels qui éliminent les polluants, les sédiments et les nutriments excessifs de l'eau. Enfin, en plus d'être des puits de carbone très importants (Mitsch *et al.*, 2013), les zones humides sont le support d'une biodiversité très riche, fournissant un habitat pour une grande diversité d'espèces végétales et animales. Leur protection et leur restauration sont donc cruciales, non seulement pour une gestion plus durable des ressources en eau, mais également pour mieux préserver la biodiversité (Zedler et Kercher, 2005).

## ■ Préserver les milieux naturels

Outre les écosystèmes spécifiques déjà évoqués, tous les milieux naturels terrestres de manière générale — c'est-à-dire les zones couvertes d'une végétation naturelle ou semi-naturelle (prairies, forêts, landes, fourrés...) et dont les sols n'ont pas été artificialisés (urbanisés, labourés ou traités avec des produits phytosanitaires) — présentent le plus souvent la faculté de permettre une meilleure infiltration des eaux pluviales dans les sols et de recharger les nappes souterraines. Leur préservation (comme leur restauration) est donc nécessaire dans un objectif de limiter autant que possible les risques de sécheresse et d'inondation à l'échelle du bassin versant, tout en apportant des bénéfices pour la biodiversité (ces milieux étant riches en espèces) et le stockage du carbone.

## ■ Arasement des seuils

Comme illustré précédemment dans cet ouvrage, la construction de barrages et de seuils impacte fortement les dynamiques hydromorphologiques et sédimentaire des cours d'eau. À travers la création de retenues, ils peuvent également contribuer à accentuer l'assèchement des bassins versants, bien que cet impact puisse être très variable — notamment suivant les usages de l'eau auxquels ils visent à répondre (voir section « La création de stockages artificiels »). Mais surtout, leur impact concerne la fragmentation spatiale qu'ils imposent aux cours d'eau. Ainsi, lorsque l'opération est possible, l'arasement des seuils (ou suppression des barrages) dans les cours d'eau présente plusieurs bénéfices écologiques et hydrologiques.

Leur suppression permet, tout d'abord, de restaurer la continuité écologique — c'est-à-dire la capacité pour les organismes aquatiques de se déplacer — favorisant ainsi la diversité biologique et la santé des populations (Bednarek, 2001). En rétablissant un écoulement naturel, l'arasement permet également d'améliorer l'oxygénation et la qualité globale de l'eau, bénéficiant à nouveau à l'ensemble de la biodiversité (Stanley et Doyle, 2003). Le rétablissement des régimes naturels de crue permet par ailleurs de favoriser

la biodiversité en diversifiant les habitats aquatiques, tout en favorisant la recharge des nappes souterraines, si le cours d'eau est reconnecté avec ses zones d'expansion de crue. De plus, en permettant la recirculation des sédiments, l'arasement favorise la reconstitution des berges (limitant leur érosion) et des plaines inondables. Dans certains cas, la suppression de seuil, en rétablissant le régime naturel d'écoulement du cours d'eau, permet aussi de restaurer ses zones humides latérales et d'augmenter les capacités de rétention d'eau, réduisant le risque d'inondation en aval, tout en permettant un meilleur soutien des débits d'étiage en période sèche (Stanley et Doyle, 2003). Ainsi, même si ce type de solution apporte avant tout des bénéfices pour la biodiversité, il peut également présenter un intérêt hydrologique relativement important. Ces avantages doivent néanmoins être mis en balance avec les avantages que permettait la présence de ces seuils (production d'énergie, navigation, prévention des inondations...).

## ■ Restauration des cours d'eau

Dans la continuité des mesures d'arasement de seuil, de nombreuses autres actions peuvent être mises en œuvre, afin de restaurer les conditions écologiques et le fonctionnement naturel des cours d'eau ayant été canalisés, rectifiés et recalibrés (Palmer *et al.*, 2005). L'objectif ici est uniquement de donner un aperçu non exhaustif de quelques mesures existantes — le lecteur étant invité à creuser plus en détail la question si le sujet l'intéresse (Beechie *et al.*, 2010 ; Alp *et al.*, 2024). Tout d'abord, le reméandrage est une technique de restauration qui vise à rétablir les méandres naturels de cours d'eau (Kondolf, 2006). Cette action permet de ralentir les flux d'eau, réduisant de fait l'érosion et le risque d'inondation, en augmentant le stockage de l'eau pendant les périodes de crue (Roni *et al.*, 2008). Cela permet également d'améliorer la qualité de l'eau — les zones méandriformes favorisant la sédimentation des particules et la filtration des polluants —, tout en diversifiant les habitats aquatiques et ripariens (se développant sur les bords des cours d'eau ou des plans d'eau), soutenant une biodiversité importante.

De même, la remise en fond de vallée est une méthode de restauration écologique visant à repositionner un cours d'eau dans sa position naturelle ou dans une position qui optimise ses fonctions écologiques et hydrologiques. Cela implique généralement le déplacement d'un cours d'eau qui avait été artificiellement canalisé ou rectifié pour qu'il retrouve son tracé méandriforme original dans le fond de la vallée, où il peut interagir de manière plus naturelle avec son environnement et recréer des zones humides et plaines inondables. La restauration des cours d'eau peut également inclure des actions de recharge granulométrique — une technique consistant à ajouter des matériaux granulaires, tels que du gravier, du sable et des galets, dans le lit de cours d'eau recalibrés — afin d'améliorer les habitats aquatiques (Kondolf *et al.*, 2001), stabiliser le lit du cours d'eau, et restaurer les processus naturels de transport sédimentaire.

Enfin, ces actions de restauration écologique peuvent inclure la reconstitution de la végétation riparienne (notamment de la ripisylve) dans le but de stabiliser les sols, filtrer les polluants et fournir des habitats pour la faune. En parallèle, le retalutage

de berge est une technique de restauration et de stabilisation des berges des cours d'eau, visant à prévenir l'érosion, à améliorer la qualité de l'habitat riverain et à rétablir les fonctions écologiques naturelles. Ce processus implique le remodelage des berges pour créer des pentes plus douces et plus stables, souvent en combinaison avec la végétalisation et d'autres techniques de bio-ingénierie.

## Adaptation de l'agriculture

Comme illustré à de nombreuses reprises précédemment, sécheresses et inondations sont deux facettes d'un même problème : des territoires dans l'incapacité de retenir naturellement l'eau issue des précipitations (dans les sols, les nappes souterraines, la végétation...). Or, en France, les espaces agricoles recouvrent plus de la moitié du territoire<sup>128</sup>. Ils constituent donc un des leviers les plus importants pour augmenter la résilience hydrique des territoires, d'autant que la dégradation continue des sols agricoles (du fait de l'érosion, du tassement...) — en plus de leur grignotage par l'urbanisation — menace également fortement l'approvisionnement alimentaire (Majnoni d'Intignano, 2024). Dans ce contexte, cette section s'attache à présenter un ensemble de solutions permettant de maximiser l'infiltration de l'eau en adaptant les modes de couverture et d'usage des sols dans les pratiques agricoles (The Shift Project, 2024). Ces solutions s'insèrent au sein de courants d'agriculture plus généraux — tels que « l'agroécologie » (Wezel *et al.*, 2009 ; Altieri, 2018) ou « l'agriculture régénérative » (Rhodes, 2017 ; Newton *et al.*, 2020 ; White, 2020 ; Giller *et al.*, 2021) — visant à restaurer et à améliorer la santé des sols, à accroître la biodiversité et à renforcer les écosystèmes agricoles.

Au final, ces solutions n'offrent pas d'approche « clé en main », mais demandent une adaptation au contexte de chaque exploitation agricole. Il s'agit d'approches relativement « en rupture » avec les pratiques conventionnelles, nécessitant de repenser l'ensemble du système de production, l'organisation, le matériel et le processus de prise de décision dans le pilotage des pratiques. La bonne combinaison d'approches est donc à trouver afin de permettre la meilleure résilience du système agricole, tout en conservant une productivité suffisante pour l'exploitant. Quoi qu'il en soit, la mise en place de ces solutions impose une technicité plus importante aux agriculteurs et souligne la nécessité d'un accompagnement adapté (formation, soutien économique, main-d'œuvre supplémentaire...). En d'autres termes, ces évolutions nécessaires des pratiques agricoles resteront certainement limitées en l'absence d'accompagnement à des échelles plus larges — renvoyant, à nouveau, à un besoin de couplage avec des solutions sociales et politiques.

128. <https://agriculture.gouv.fr/quelle-part-du-territoire-francais-est-occupee-par-lagriculture> (consulté le 18/08/2025).

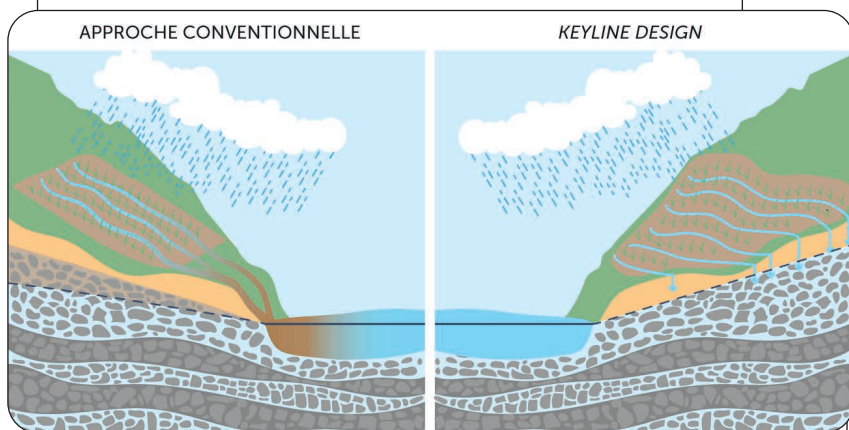


## ■ Keyline design

Parfois présenté comme une manière de « planter la pluie »<sup>129</sup>, le *Keyline design* est une approche développée dans les années 1950 et visant à améliorer la rétention et la distribution de l'eau dans les paysages agricoles, dans le but d'augmenter la productivité du sol et la résilience des systèmes agricoles face aux sécheresses et à l'érosion (Yeomans, 1954, 1958 et 1978). Plus qu'une approche unique, ce terme désigne un ensemble de techniques agricoles visant à travailler avec la topographie pour mieux répartir l'eau dans le paysage (Johansson *et al.*, 2022). La démarche se base avant tout sur le concept de *keyline* (ligne-clé), c'est-à-dire l'identification de lignes topographiques spécifiques (courbes de niveau optimales) utilisées pour aménager les paysages en accord avec les contours naturels et les propriétés hydrologiques des sols<sup>130</sup>. Cet aménagement permet ensuite de répartir l'eau, à partir des points où elle est naturellement concentrée vers les zones où elle est plus utile pour l'irrigation et la réhydratation des sols (fig. 6.1)<sup>131</sup>.

Ces aménagements se basent notamment sur l'utilisation de techniques de labour dites elles-mêmes *keyline*, c'est-à-dire suivant les courbes de niveau, afin de permettre à l'eau de s'écouler perpendiculairement à la pente (lui laissant ainsi plus de temps pour s'infiltrer) au lieu de ruisseler immédiatement vers l'aval (del Carmen

**Figure 6.1.** Représentation simplifiée de l'effet hydrologique du *Keyline design* comparé à une approche plus « conventionnelle ».



Source : © Water Family, d'après del Carmen Ponce-Rodríguez *et al.* (2021).

129. [https://www.franceinfo.fr/environnement/reportage-journee-mondiale-de-l-eau-qu-est-ce-que-le-keyline-design-cette-technique-venue-d-australie-pour-planter-la-pluie\\_5725700.html#comments-embed](https://www.franceinfo.fr/environnement/reportage-journee-mondiale-de-l-eau-qu-est-ce-que-le-keyline-design-cette-technique-venue-d-australie-pour-planter-la-pluie_5725700.html#comments-embed) (consulté le 18/08/2025).

130. [https://wiki.tripleperformance.fr/wiki/Keyline\\_design](https://wiki.tripleperformance.fr/wiki/Keyline_design) (consulté le 18/08/2025).

131. <https://permalab.fr> (consulté le 18/08/2025).

Ponce-Rodríguez *et al.*, 2021)<sup>132</sup>. Les approches de *Keyline design* peuvent également intégrer la culture en terrasses (c'est-à-dire le fait de cultiver en bandes le long des courbes de niveau), favorisant, à nouveau, une meilleure infiltration de l'eau et réduisant le ruissellement. Cette infiltration de l'eau est également renforcée grâce à la création de petites buttes de terre et de noues (parfois appelées aussi « baissières ») (Ekka *et al.*, 2021), à des endroits spécifiques suivant les courbes de niveau (toujours perpendiculairement à la pente), afin de ralentir temporairement les eaux de pluie et leur permettre de pénétrer le sol. En plus de cette gestion particulière de l'eau à l'échelle de la parcelle, le *Keyline design* vise à intégrer de nombreuses pratiques agricoles durables pour améliorer la santé du sol, telles que l'agroforesterie (comme en combinant le pâturage et les rangées d'arbres), le semi sous-couvert, le sous-solage... Ces méthodes seront présentées plus en détail dans les pages suivantes.

Au final, l'approche par le *Keyline design* — et la redistribution de l'eau qu'elle apporte à l'échelle du paysage — permet de prévenir l'érosion, d'augmenter l'infiltration et de maintenir une humidité adéquate dans le sol (Giambastiani *et al.*, 2022). Un des avantages de cette approche est qu'elle peut également être utilisée dans une multitude de contextes autres qu'agricoles, tels que la gestion forestière, la restauration écologique, la gestion des bassins versants, ou encore la planification urbaine. Néanmoins, chaque paysage étant différent (au niveau topographie, climat, végétation...), l'approche nécessite d'être adaptée à chaque terrain et ne peut en aucun cas être généralisée totalement. De plus, elle impose souvent un changement important des pratiques (en termes de mécanisation, d'entretien, de temps) et doit donc être ajustée aux capacités des exploitants. Elle ne vise pas non plus à remplacer totalement l'irrigation : l'objectif étant principalement de venir améliorer l'humidité dans les sols — pouvant ensuite limiter un peu les besoins en irrigation. Quoiqu'il en soit, lorsque son utilisation est possible, cette approche intégrée reste relativement intéressante — permettant non seulement d'augmenter la résilience des systèmes agricoles, mais aussi celle des écosystèmes, dans un contexte de changement climatique.

## ■ Agroforesterie

L'agroforesterie (Nair *et al.*, 2021) est une approche consistant à intégrer des arbres et arbustes dans les systèmes agricoles (cultures, prairies...), et qui présente de nombreux avantages (Young, 1989), vis-à-vis de la gestion de l'eau, mais pas uniquement (Josre, 2009 ; Udawatta *et al.*, 2017 ; Kay *et al.*, 2019). Ce type de pratique peut être illustré à travers divers exemples historiquement courants en France, tels que le bocage (mosaïque de prairies et cultures, de tailles et formes variables, délimitée par des haies et talus) ou les vergers (prairies couvertes par des arbres fruitiers).

132. <https://www.ecofarmingdaily.com/build-soil/keyline-design-transforms-farm-water-management> (consulté le 18/08/2025).

Tout d'abord, un des gros bénéfices des systèmes agroforestiers est qu'ils permettent de stabiliser les sols grâce aux racines profondes des arbres et des arbustes, ce qui réduit généralement le ruissellement et l'érosion, surtout sur les pentes et les terrains inclinés. Les racines maintiennent ainsi le sol en place et limitent la perte de terre arable lors des fortes pluies — réduisant les phénomènes de coulées de boue notamment. De plus, les racines des arbres créent des canaux qui permettent à l'eau de s'infiltrer plus efficacement dans les sols, augmentant ainsi la recharge des nappes souterraines tout en filtrant les polluants<sup>133</sup>. L'infiltration est de plus favorisée par la présence de matière organique au voisinage des arbres et arbustes (enrichie par la litière des feuilles tombant au sol) — ce qui améliore aussi la fertilité des sols. De fait, cette amélioration de l'infiltration (en particulier en cas de fortes précipitations) permet ensuite d'alimenter le reste du bassin versant lors de périodes plus sèches. Les systèmes agroforestiers favorisent ainsi une régulation des flux hydrologiques — permettant d'atténuer les risques d'inondation et de sécheresse.

Ensuite, les arbres et arbustes peuvent agir comme des brise-vent (paravent) et des parasols, ce qui réduit l'évaporation de l'eau du sol et des cultures, tout en favorisant des conditions climatiques plus stables localement (température, humidité). En créant des microclimats plus humides et en protégeant les cultures des vents desséchants, ils permettent une utilisation plus efficace de l'eau disponible pour la végétation. Il est néanmoins nécessaire de légèrement nuancer ce type de bénéfice dans la mesure où, dans certains cas, la présence des arbres (ayant des besoins conséquents en eau) peut également se traduire par une augmentation de l'évapotranspiration, entraînant une diminution du bilan hydrique à l'échelle du bassin versant (Mwangi *et al.*, 2016). Il arrive aussi que la présence d'ombre en bordure des arbres entraîne une perte de rendement, tout en engendrant de l'entretien supplémentaire pour l'exploitant (qui est souvent très peu valorisé économiquement). Ainsi, comme pour toutes les solutions présentées dans cet ouvrage, la mise en place de mesures d'agroforesterie seules n'est pas en soi un gage de bénéfices importants. Elle doit être pensée au cas par cas, en fonction du contexte local (Torralba *et al.*, 2016). Au final, lorsque l'approche est adaptée, elle présente toutefois des avantages significatifs en stabilisant les sols et en régulant les flux hydrologiques pour atténuer les impacts des conditions climatiques extrêmes (Montagnini, 2005).

## ■ Favoriser la diversité paysagère

Dans la continuité des solutions proposées précédemment, la diversité paysagère (ou l'hétérogénéité paysagère) — c'est-à-dire la composition et la configuration des types de couverts végétaux et des structures paysagères (Li *et al.*, 2021) — joue un rôle essentiel dans le maintien ou la restauration des fonctions hydrologiques naturelles des espaces agricoles (Qiu et Turner, 2015).

133. <https://www.eau-seine-normandie.fr/NL14/Agroforesterie-carte-a-jouer-pour-votre-exploitation-agricole> (consulté le 18/08/2025).

Cette diversité paysagère (alternant bocage, différentes cultures, prairies, zones humides...) — comparativement à l'uniformisation des paysages agricoles sous l'effet de l'agriculture intensive (parcelles de grandes superficies en monocultures) — permet une certaine irrégularité (ou « rugosité ») qui augmente la capacité du sol à absorber et retenir l'eau, réduisant ainsi le ruissellement de surface. De manière générale, cela contribue à atténuer les risques d'inondation et de sécheresse (en libérant lentement l'eau stockée pendant les périodes plus humides). Il convient toutefois de légèrement nuancer ces bénéfices dans la mesure où, si leur impact sera concret dans le cas d'événements de faible intensité, celui-ci sera plus faible face à certaines conditions extrêmes (par exemple des pluies intenses ou sur des sols déjà saturés).

Cette variété de couvertures végétales permet également de réduire significativement les risques d'érosion et de coulées de boue — en protégeant le sol contre le ruissellement et en stabilisant les sédiments — grâce à une plus grande diversité racinaire. Ainsi, elle permet une plus grande résilience face aux effets du changement climatique. De plus, cette hétérogénéité du paysage apporte également de nombreux bénéfices pour l'amélioration de la qualité de l'eau — l'alternance de zones végétalisées permettant de mieux filtrer les polluants et les nutriments avant qu'ils n'atteignent les cours d'eau. Enfin, cette diversité paysagère permet de soutenir une plus grande diversité d'espèces du fait de la présence de plus nombreux habitats pouvant les héberger.

## ■ Limiter les drainages

L'objectif étant de favoriser l'infiltration et le stockage de l'eau dans les sols à l'échelle des bassins versants, limiter les drainages (en zones agricoles, mais également en zones urbaines) — dont l'opération, en vue d'accroître les zones labourables ou l'intensité de l'agriculture, consiste justement à artificiellement évacuer l'eau présente dans la couche supérieure du sol — est également une solution qu'il est indispensable d'envisager. Cette mesure est d'autant plus importante que les drainages ont généralement conduit à faire disparaître, en quelques décennies seulement, de nombreux milieux naturels dont la préservation fait aussi partie des solutions identifiées précédemment (zones humides, zones d'expansion de crues...). Ces drainages ayant été mis en place pour un certain nombre de bonnes raisons (en particulier en agriculture), leur limitation doit se poser en parallèle d'autres transitions dans les pratiques (d'extensification agricole, par exemple), ce qui, à nouveau, semble difficilement réalisable seul — nécessitant ainsi d'être accompagné de leviers d'action politique et économique.

En tout cas, quelle que soit la manière de procéder (réglementation concernant la réalisation de nouveaux ouvrages<sup>134</sup>, suppression d'ouvrages existants<sup>135</sup>...), limiter le

134. <https://www.gers.gouv.fr/Actions-de-l-Etat/Environnement/Gestion-de-l-eau/Cours-d-eau-fosses-et-drainages-agricoles/Drainage-agricole-les-obligations> (consulté le 18/08/2025).

135. [https://www.lamontagne.fr/clugnat-23270/economie/pour-la-premiere-fois-en-creuse-ces-agriculteurs-ont-fait-le-choix-de-dedrainer-leurs-prairies-pour-leur-redonner-vie\\_14611472](https://www.lamontagne.fr/clugnat-23270/economie/pour-la-premiere-fois-en-creuse-ces-agriculteurs-ont-fait-le-choix-de-dedrainer-leurs-prairies-pour-leur-redonner-vie_14611472) (consulté le 18/08/2025).

nombre de drainages présente de nombreux avantages collectifs vis-à-vis de la gestion de l'eau à l'échelle des bassins versants. Tout d'abord, lorsque les systèmes de drainage sont supprimés, l'une des principales améliorations observées rapidement est la rétention accrue de l'eau dans les sols (favorisant ensuite la recharge des nappes souterraines) (Menberu *et al.*, 2018), bien que ce résultat puisse en partie dépendre des conditions locales (Ballard *et al.*, 2012). À terme, la suppression des drainages permet de restaurer le régime hydrologique naturel des milieux (effet tampon), contribuant à atténuer les effets des inondations en période de fortes pluies, tout en soutenant ensuite mieux le milieu naturel durant les périodes de sécheresse.

Sur le long terme, en ralentissant le flux de l'eau, la suppression des drainages diminue également le transfert d'éléments (nutriments, polluants...) vers les eaux de surface (ceux-ci étant mieux retenus dans les sols), ce qui permet ainsi d'améliorer la qualité de l'eau en aval (Haapalehto *et al.*, 2014). Un autre bénéfice important est la restauration des fonctions écologiques de nombreux milieux humides jouant un rôle crucial dans la séquestration du carbone, ce qui aide ainsi à atténuer le changement climatique. Enfin, la suppression des drainages permet également de restaurer les habitats naturels nécessaires à de nombreuses espèces, contribuant ainsi à la conservation de la biodiversité.

## ■ Adapter les choix cultureux

Parmi les multiples solutions complémentaires permettant d'accroître la résilience des systèmes agricoles (pour mieux s'adapter aux aléas), il est nécessaire de bien adapter les choix cultureux<sup>136</sup>. Le principe repose notamment sur la diversification des cultures et des variétés, l'utilisation de systèmes racinaires de différentes profondeurs et le maintien d'une couverture permanente du sol. Tout d'abord, une des stratégies clés consiste à sélectionner des cultures mieux adaptées à l'évolution des conditions climatiques locales — en particulier, la diminution de la disponibilité en eau. Choisir des variétés plus tolérantes à la sécheresse, telles que le sorgho, le millet ou certains types de haricots, peut ainsi réduire les besoins d'irrigation intensive (Blum, 2005). Ensuite, la rotation culturale (c'est-à-dire l'alternance de types de cultures plantées sur un même terrain) permet d'améliorer la structure du sol et sa capacité à infiltrer l'eau (Thierfelder *et al.*, 2013 ; Yang *et al.*, 2015). Entre ces cultures, l'utilisation d'un couvert intermédiaire améliore la santé du sol et la disponibilité en eau, en limitant le ruissellement et l'érosion (voir la section suivante, pour plus de détails).

Chaque type de culture offrant des capacités d'infiltration différentes (Stone et Schlegel, 2010), leur association — consistant à cultiver simultanément plusieurs espèces végétales ou variétés sur la même parcelle — est un autre type de mesure permettant d'améliorer les capacités d'infiltration des sols, tout en apportant bien d'autres bénéfices

136. <https://www.eau-seine-normandie.fr/NL14/Agroforesterie-carte-a-jouer-pour-votre-exploitation-agricole> (consulté le 18/08/2025).

(Gebhard *et al.*, 2013 ; Wan *et al.*, 2024). Notamment, les plantes peuvent se rendre divers services, tels que la fertilisation, la protection contre les stress abiotiques, et l'action répulsive ou toxique sur certains insectes ou adventices (les « mauvaises herbes »). L'agroforesterie est d'ailleurs une forme d'association de cultures — combinant des cultures annuelles avec des cultures pérennes (arbres) — dont les bénéfices ont été discutés plus haut, en section « Agroforesterie ». Favoriser les cultures aux racines profondes, pérennes et diversifiées favorise une meilleure infiltration de l'eau dans les sols, tout en permettant d'exploiter plus efficacement l'eau et les nutriments situés en profondeur.

Enfin, contrairement aux cultures issues de variétés « modernes » (présentant souvent des individus identiques génétiquement, sélectionnés afin de maximiser la standardisation et les rendements), les cultures intégrant une plus grande diversité génétique, notamment des variétés anciennes, sont généralement mieux adaptées à un environnement en perpétuel changement. En d'autres termes, bien qu'elles présentent, dans le contexte actuel, des rendements moindres, leur plus grande rusticité pourrait leur permettre plus de tolérance face aux évolutions hydroclimatiques. Ainsi, cette adaptation des choix culturels permet non seulement d'agir sur l'atténuation des risques liés à l'eau, mais également sur la résilience des systèmes agricoles face au changement climatique. Il convient toutefois de noter, à nouveau, que ces choix seront tributaires d'enjeux économiques propres à chaque exploitant. Il convient donc de bien prendre en considération cet aspect préalablement à la mise en place de ce type de levier d'action.

## ■ Préserver la qualité des sols

Le sol est un élément vital pour la gestion efficace de l'eau en agriculture (Schreefel *et al.*, 2020). La préservation de la qualité et de la santé des sols passe donc par la mise en œuvre de pratiques agricoles plus durables que l'approche « conventionnelle » actuelle (Visser *et al.*, 2019). En parallèle des mesures déjà mentionnées précédemment qui permettent également d'améliorer la santé des sols, le maintien d'un couvert d'interculture (planté pendant les périodes où les champs seraient autrement nus)<sup>137</sup> réduit le risque d'érosion, améliore généralement la structure du sol et augmente sa teneur en matière organique — favorisant ainsi l'infiltration de l'eau (Basche *et al.*, 2016). En complément, la mise en place de couverts d'interculture peut aussi présenter des bénéfices agronomiques vis-à-vis des cultures suivantes — par exemple, une interculture à l'aide de plantes de la famille des légumineuses permet d'enrichir naturellement les sols en azote (Vertès *et al.*, 2015). Ensuite, le paillage — qui consiste à couvrir le sol avec des matériaux organiques ou inorganiques (appelés paillis ou *mulch*) — aide également à réduire l'évaporation de l'eau, à conserver l'humidité du sol, à réduire les adventices et à protéger le sol de l'érosion (Adekalu *et al.*, 2007). Ce paillage peut d'ailleurs représenter la suite d'une culture de couverture qui, une fois coupée, serait laissée sur place comme couverture passive.

137. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/choisir-son-couvert-selon-la-rotation-culturale-et-la-culture-suivante> (consulté le 18/08/2025).

Une des principales causes d'érosion et de dégradation des sols provient également de leur labour intensif (en fréquence et en profondeur) (Lee *et al.*, 2021). Aussi, une autre manière de préserver leur qualité (pour réduire l'érosion, les coulées de boues et améliorer l'infiltration de l'eau) passe par la mise en œuvre de mesures de limitation du travail du sol (voire du non-labour) (Alliaume *et al.*, 2014). Dans ce but, la pratique du semis direct — qui consiste à planter des cultures en perturbant le moins possible le sol (sans labour ou après un travail très superficiel) — permet de laisser le sol pratiquement intact entre les saisons de récolte (Merten *et al.*, 2015). La technique du « sursemis » — visant à introduire une ou plusieurs espèces prairiales (graminées, légumineuses...) dans une prairie sans détruire totalement la flore existante (Lemasson *et al.*, 2008) — s'apparente aussi à cette famille d'approches. Les bénéfices environnementaux du semis direct sont bien reconnus dans la littérature (Souza *et al.*, 2016), en particulier lorsqu'il est combiné avec la couverture permanente du sol et la rotation des cultures (évoquées précédemment) (Govaerts *et al.*, 2007 ; Palm *et al.*, 2014). En réduisant la perturbation du sol par rapport au labour conventionnel (conservant ainsi sa structure), il permet notamment de limiter l'érosion (du fait de la minimisation du temps pendant lequel le sol est exposé au vent, à la pluie et au ruissellement), ainsi que d'augmenter l'infiltration de l'eau (réduisant ainsi le ruissellement) (Verhulst *et al.*, 2010). En outre, le semis direct peut contribuer à améliorer la capacité de rétention d'eau des sols, à augmenter la matière organique et à réduire les coûts de carburant, de main-d'œuvre et de machines de travail du sol (Claassen *et al.*, 2018), tout en participant à diminuer la charge excessive de phosphore et, dans certains cas, de nitrates dans les eaux de ruissellement (Soana *et al.*, 2012).

Le semis direct, la couverture permanente du sol et la rotation des cultures constituent ainsi les trois piliers de ce qui est appelé « l'agriculture de conservation » (sous-entendu « de conservation des sols ») (Friedrich *et al.*, 2012). Malgré le débat actuel sur les limites de cette agriculture de conservation pour relever durablement le défi de nourrir une population mondiale croissante, la littérature scientifique suggère qu'elle pourrait devenir une stratégie importante d'adaptation au changement climatique pour les régions du monde de plus en plus sèches (Pittelkow *et al.*, 2015). Cependant, un des intérêts majeurs du labour est également de permettre un désherbage mécanique de la parcelle avant de semer les cultures et de lutter contre les adventices. Afin de pallier l'absence de désherbage mécanique apporté par le labour, l'agriculture de conservation et les approches de semis direct font ainsi généralement un usage important d'herbicides — permettant de faire « place nette » avant de semer une nouvelle culture (Derrouch *et al.*, 2020). Pour cette raison, les herbicides comme le glyphosate (l'un des plus connus et plus utilisés à l'échelle mondiale) sont parfois considérés comme le quatrième pilier de l'agriculture de conservation<sup>138</sup>.

138. <https://agriculture-de-conservation.com/sites/agriculture-de-conservation.com/IMG/pdf/glyphosate-tcs-62.pdf> (consulté le 18/08/2025).

Or, comme illustré dans cet ouvrage, l'utilisation massive de produits chimiques de synthèse (engrais, produits phytosanitaires...) impacte fortement les sols, et l'environnement de manière générale. Malgré les difficultés, réduire leur utilisation (à l'image du plan Ecophyto français ; Guichard *et al.*, 2017) semble une nécessité, de la même façon que la réduction du travail du sol. Concilier non-labour et suppression (ou tout du moins limitation) des herbicides est donc actuellement un enjeu majeur pour les agriculteurs. Afin de répondre à ce défi, l'approche par « semis direct sous couvert végétal » est une alternative proposée par certains acteurs du monde agricole<sup>139</sup> (Vincent-Caboud, 2020). L'objectif de cette approche est de maintenir constamment un couvert végétal — contrôlant ainsi les adventices — tout en permettant de semer une nouvelle récolte (sous couvert végétal détruit ou bien vivant). La destruction du couvert végétal existant se fait à l'aide d'un outil spécifique (un rouleau FACA par exemple), puis la culture est semée avec un travail du sol minimum (localisé au niveau de la ligne de semis). Ce procédé permet de constituer un paillis (matière sèche constituée des résidus du couvert végétal préexistant) sur la surface, créant ainsi une barrière physique au développement d'adventices et apportant des bénéfices similaires à un paillis classique. Toujours en cours de perfectionnement, cette approche pourrait permettre de répondre en partie aux enjeux actuels et futurs, mais demandera une adaptation aux spécificités propres à chaque exploitation agricole (à nouveau, il ne s'agit pas d'une recette « miracle »).

139. <https://www.agro-league.com/semis-direct/semis-direct-sous-couvert-vegetal> (consulté le 18/08/2025).



## 7. Solutions techniques et technologiques

L'impact des activités humaines sur l'environnement doit également être pensé en parallèle d'aspects technologiques. En effet, au fil du temps, de nombreuses solutions techniques ont été développées, notamment afin d'améliorer la disponibilité et l'efficacité de l'utilisation des ressources (l'eau en particulier, mais pas uniquement). Dans ce contexte, cette catégorie regroupe un ensemble de solutions issues de l'ingénierie plus « traditionnelle » et visant également (tout comme les SFN) à optimiser la disponibilité de l'eau sur le territoire. Cependant, du fait qu'elles n'apportent généralement pas de bénéfices pour la biodiversité et qu'elles n'ont pas pour objectif de réduire les usages de l'eau, elles ne semblent pas une réponse à envisager en premier.

Pourtant, ces leviers techniques et technologiques sont souvent vus (au niveau politique ou médiatique notamment) comme les principales réponses possibles aux problématiques environnementales. Selon un point de vue prédominant, la modernisation (le progrès scientifique, la mondialisation et les innovations technologiques), plutôt que d'être le principal moteur de la dégradation de l'environnement, pourrait ainsi être l'une des meilleures solutions (Benton *et al.*, 2002). Cependant, bien qu'il ne faille nullement sous-estimer les bénéfices potentiels d'améliorations technologiques, il semblerait également judicieux de se prémunir de toute forme de « fuite en avant », dans la mesure où il semble parfois y avoir des malentendus concernant les effets de l'innovation technologique (Parrique *et al.*, 2019). Si certaines innovations peuvent effectivement accroître l'efficacité, d'autres, en revanche, conduisent à une augmentation du taux d'extraction et de consommation de ressources — exposant ainsi à des risques de maladaptations (Bertana *et al.*, 2022). En outre, même dans le cas de technologies améliorant l'efficacité, les gains d'utilisation de ressources sont souvent contrebalancés par une augmentation de la consommation individuelle — un processus bien connu appelé « effet rebond » (Greening *et al.*, 2000 ; Smil, 2008) ou « Paradoxe de Jevons » (Jevons, 1866 ; Alcott, 2005 ; Polimeni et Polimeni, 2006 ; Sorrell, 2009). Par conséquent, les données empiriques montrent qu'en dépit d'innovations technologiques considérables, jusqu'à présent l'effet concret a été une augmentation continue de l'utilisation des ressources par habitant (Motesharrei *et al.*, 2006).

À titre d'exemple (dans un domaine autre que la gestion de l'eau), la course actuelle au développement de technologies dites « vertes » tend à sous-estimer leurs conséquences en matière d'utilisation de ressources minérales et de dégradation de l'environnement (Kirsch, 2010). Il a notamment été souligné que « les impacts des activités minières sur la biodiversité augmenteront à mesure que davantage de mines cibleront les matériaux pour la production d'énergie renouvelable et, sans planification

stratégique, ces nouveaux impacts pourraient dépasser ceux évités par l'atténuation du changement climatique » (Sonter *et al.*, 2020). Ces impacts potentiels s'expliquent en partie du fait que la quantité de métaux à extraire au cours des trente prochaines années pourrait dépasser la quantité cumulée produite depuis le début de l'humanité (Vidal, 2017 et 2020). Dans ce contexte, les innovations technologiques accentueraient les problèmes environnementaux au lieu d'être une solution. À ce titre, l'innovation technologique a d'ailleurs jusqu'à présent échoué à découpler croissance économique et impacts sur l'environnement (Vadén *et al.*, 2020). Par conséquent, celle-ci doit être traitée avec beaucoup de précautions lorsqu'elle est considérée comme une solution aux problèmes environnementaux.

Dans le cadre de la gestion locale de l'eau, le débat concernant l'utilisation de leviers techniques semble souvent se polariser sur la posture du « pour » ou « contre », sans s'interroger à propos de l'endroit où chaque solution serait la mieux adaptée, et pour quels usages. En réalité, dans certains contextes et sous certaines conditions, les leviers techniques et technologiques permettent certainement de répondre à une partie des enjeux — notamment là où d'autres catégories de solutions atteindraient leurs limites. Pour autant, ces leviers ne constituent pas des solutions « miracles » à appliquer partout sans considération des spécificités propres à chaque territoire. Faisant partie du panel de solutions à disposition, la mise en œuvre de ces leviers (au même titre que l'ensemble des solutions présentées précédemment) nécessite d'être décidée au cas par cas, en prenant en compte chaque territoire et ses spécificités (usages, géographie, climat, géologie...).

En fin de compte, la question n'est donc pas seulement de savoir si la technologie peut contribuer à rendre les territoires plus résilients, mais aussi quelles politiques et mesures sont nécessaires pour développer les bonnes technologies, les adopter à temps, pour un usage approprié (Bigo, 2020) — renvoyant, à nouveau, au besoin de coupler ces leviers aux catégories de solutions présentées précédemment (les solutions sociales et politiques en particulier). Cette section vise ainsi à présenter certains leviers techniques et technologiques mobilisables dans un contexte d'adaptation des territoires, avec leurs avantages et leurs limites à prendre en considération.

## Réutilisation des eaux usées

La réutilisation des eaux usées (eaux domestiques, eaux pluviales, eaux industrielles...) est une pratique qui consiste en l'utilisation d'eaux usées plus ou moins traitées, dans un objectif de valorisation dans de nouveaux usages<sup>140</sup>. En France, cette pratique peut être appelée « REUT » (pour « Réutilisation des eaux usées traitées ») — englobant

140. <https://www.cieau.com/eau-transition-ecologique/solutions/reutilisation-des-eaux-usees-traitees-un-formidable-procede-deconomie-circulaire> (consulté le 18/08/2025).

uniquement l'eau réutilisée ayant été traitée — ou encore « REUSE » (de l'anglais *reuse* signifiant « réutiliser ») — englobant toutes les sources d'eau réutilisées, que cette eau ait été traitée ou non. Historiquement, cette pratique a été extrêmement réglementée en France, limitant jusqu'à présent son déploiement en comparaison d'autres pays du monde<sup>141</sup>. De plus, le déploiement de cette solution est tributaire de son acceptation sociale, notamment en raison de la perception des risques pour la santé qu'elle représente. Aussi, son déploiement doit s'accompagner à la fois d'une évolution de la réglementation (vers plus de souplesse pour permettre une utilisation plus large) et d'un effort de sensibilisation. Néanmoins, cette évolution est à présent en cours<sup>142</sup>, la REUT faisant notamment partie du plan Eau présenté en 2023 par le gouvernement français<sup>143</sup>.

Les applications possibles de la REUT sont nombreuses et dépendent des niveaux de traitement (Bixio *et al.*, 2006). Historiquement, les eaux usées (traitées ou non) ont principalement été réutilisées pour l'irrigation de terres agricoles (Ofori *et al.*, 2021). Dans l'industrie, la REUT est également intéressante dans les secteurs qui nécessitent de grands volumes d'eau — notamment pour des usages tels que le refroidissement (par exemple pour la fabrication de métaux, de papier et de plastiques) (Rebhun et Engel, 1988) ou le nettoyage. Des applications urbaines sont également possibles, comprenant des utilisations extérieures telles que l'arrosage des parcs et espaces verts urbains (jardins, golfs...) ou la lutte contre les incendies, ainsi que des utilisations intérieures telles que les chasses d'eau et, en fonction de la qualité de l'eau, le nettoyage des véhicules et le lavage des vêtements (Duong et Saphores, 2015). La REUT peut aussi avoir des applications environnementales, comprenant, par exemple, l'approvisionnement en eau des zones humides, le soutien des débits d'étiage des cours d'eau et la recharge des aquifères. En France, cette restitution au milieu naturel (eaux de surface) constitue d'ailleurs la finalité de la quasi-intégralité des eaux usées traitées (voir plus haut, la section « Le petit cycle de l'eau »). Enfin, la réutilisation directe pour l'eau potable existe, mais elle est très rare, avec seulement quelques applications dans le monde (Gheraout, 2018).

Le principal bénéfice de cette approche d'économie circulaire est de se substituer à des prélèvements dans le milieu naturel (eaux souterraines ou de surface), permettant de diminuer la pression sur les ressources en eau douce. Suivant le contexte, améliorer la qualité de l'eau peut être un autre avantage associé à la REUT — la diminution des rejets d'eaux usées dans le milieu naturel contribuant à réduire les pollutions (Toze, 2006). En fonction de la situation locale (intensité de traitement requise, distance entre la station de traitement et l'endroit où l'eau est réutilisée...), un autre avantage encore associé à la REUT peut être d'économiser l'énergie (et le coût) liée à

141. <https://www.veolia.fr/reuse-technologie-maitrisee> (consulté le 18/08/2025).

142. <https://www.ecologie.gouv.fr/actualites/reutilisation-eaux-usees-traitees-publication-deux-nouveaux-arretes> (consulté le 18/08/2025).

143. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/plan-daction-gestion-resiliente-concertee-leau> (consulté le 18/08/2025).

l'extraction de la ressource, en particulier dans le cas de pompage d'eau souterraine. En ce qui concerne l'irrigation agricole (principal usage de la REUT à l'échelle mondiale), de nombreux autres bénéfices sont rapportés (Jaramillo et Restrepo, 2017). Tout d'abord, les eaux usées peuvent souvent contenir des concentrations importantes de nutriments organiques et inorganiques, comme l'azote et le phosphate, pouvant alors servir de source d'engrais lorsque l'eau est réutilisée pour l'irrigation. Ainsi, la REUT permettrait non seulement d'améliorer les rendements (Jiménez-Cisneros, 1995), mais également de réduire l'utilisation (et donc les dépenses) d'engrais chimiques par les agriculteurs (Adrover *et al.*, 2012 ; Candela *et al.*, 2007).

Cependant, si le principe de la REUT semble relativement simple, sa mise en œuvre peut s'avérer complexe (Condom *et al.*, 2013), d'autant qu'elle présente aussi un certain nombre d'inconvénients qu'il semble opportun de rappeler (Collard *et al.*, 2025). Les risques liés à la REUT (en particulier pour l'irrigation agricole) sont assez variables, allant d'effets néfastes sur l'environnement à des impacts sur la santé humaine. Tout d'abord, la réutilisation d'eaux usées pour l'agriculture peut négativement affecter de nombreux paramètres physicochimiques des sols, tels que le pH, le taux de matière organique, les nutriments, la salinité, les contaminants, ainsi qu'affecter la biodiversité microbienne (Jaramillo et Restrepo, 2017). Mais surtout, la REUT soulève de nombreuses questions vis-à-vis de ses impacts potentiels sur la santé. Même traitées, ces eaux restent parfois chargées de nombreux pathogènes (virus, parasites protozoaires, bactéries, helminthes...) et de polluants (substances toxiques, produits pharmaceutiques, métaux lourds...) (Yi *et al.*, 2011). Ces substances chimiques et ces agents pathogènes peuvent ainsi présenter un risque pour la santé (Khalid *et al.*, 2018) des personnes manipulant ces eaux usées traitées (les agriculteurs notamment) et des consommateurs (de produits agricoles notamment) — l'ingestion des aliments et l'inhalation par le système respiratoire étant les moyens par lesquels les agents pathogènes et les contaminants peuvent pénétrer dans le corps humain (Toze, 2006). Ainsi, la réutilisation d'eaux usées doit impérativement faire l'objet de traitements adaptés à son nouvel usage.

Il est également extrêmement important de nuancer les bénéfices apportés par la REUT vis-à-vis de la préservation des ressources en eau. De manière assez intéressante, la littérature sur le sujet (scientifique, politique, médiatique...) semble principalement mettre en avant que la REUT permet de réduire la pression de prélèvement. Dans de nombreuses sources mobilisées, il semblerait que les eaux usées traitées qui ne seraient pas réutilisées ensuite soient très souvent perçues comme « perdues ». Cependant, en France en tout cas (de nombreux exemples de pays dans le monde pratiquant la REUT se situant en zones désertiques, où les dynamiques hydrologiques sont très différentes du contexte français), ces eaux usées sont majoritairement restituées au milieu naturel, alimentant ensuite les écosystèmes et les autres usages de l'eau en aval. En ce sens, à l'échelle du bassin versant, il existe déjà une forme de réutilisation de l'eau. La restitution au milieu naturel est donc essentielle, en particulier pour soutenir les débits d'étiage de certains cours d'eau durant les périodes de

sécheresse — certains cours d'eau étant parfois dépendants quasi intégralement des rejets de stations d'épuration à certaines périodes. Aussi, la REUT comme solution d'adaptation au changement climatique doit être mise en œuvre avec précaution pour ne pas réduire le volume d'eau habituellement rejeté par les stations d'épuration dans des cours d'eau déjà soumis à des étiages sévères, au risque de maladaptation<sup>144</sup>.

Pour cette raison, l'effet de la REUT sur la réduction des prélèvements sera très dépendant du contexte local (types d'usage, géologie, géographie...) <sup>145</sup>. Dans le cas d'usages industriels (refroidissement, nettoyage...) ou domestiques (toilettes, nettoyage des canalisations...), la REUT constitue une forme de recyclage de l'eau qui peut s'avérer relativement intéressante, permettant de se substituer à des prélèvements dans le milieu naturel. Si le système fonctionne en circuit relativement fermé et permet de réutiliser l'eau plusieurs fois, quel que soit le territoire, cela permet effectivement de réduire les prélèvements dans le milieu naturel. En revanche, dans le cas de l'irrigation (pour l'agriculture ou l'arrosage d'espaces verts urbains), la majeure partie de cette eau sera ensuite évapotranspirée et ne pourra donc plus être réutilisée sur le territoire. En zone continentale (où les eaux usées alimentent ensuite le reste du bassin versant), le bénéfice d'un point de vue quantitatif de la REUT par rapport à un prélèvement dans le milieu naturel est donc relativement discutable : que l'on prélève directement l'eau dans le milieu naturel ou bien que l'on utilise de l'eau usée qui devait y être restituée, dans les deux cas, c'est de l'eau qui ne sera plus disponible pour le milieu naturel. Dans ce cas, les avantages de la REUT seraient plus d'ordre économique et agronomique (réduction des coûts d'extraction de l'eau, réduction de l'usage d'engrais...) qu'hydrologique (préservation de la ressource). Toutefois, en zone littorale (où les eaux usées sont généralement rejetées en mer), la REUT peut éventuellement (et sous conditions) être intéressante et permettre de réduire la pression sur le milieu naturel.

Ainsi, si la REUT fait clairement partie des leviers à disposition permettant de s'adapter à l'impact des pressions climatiques et anthropiques, son utilisation doit être rigoureusement encadrée — cette approche n'étant pas souhaitable partout. Il est également crucial d'éviter un effet rebond et l'illusion de disposer d'une ressource en eau supplémentaire qui pourrait encourager de nouveaux usages et aggraver la sécheresse à l'échelle du bassin versant<sup>146</sup>. En conclusion, comme le souligne un rapport du Cerema de 2020 : « Il est préférable de travailler à identifier les causes des déficits et d'infléchir la demande en eau par des mesures d'économie d'eau, avant de rechercher des solutions telles que la REUT pour pallier des manques chroniques d'eau. <sup>147</sup> »

144. [https://www.cerema.fr/system/files/documents/2020/07/2020\\_06\\_panorama\\_reut\\_pour\\_edition\\_vdef-1.pdf](https://www.cerema.fr/system/files/documents/2020/07/2020_06_panorama_reut_pour_edition_vdef-1.pdf) (consulté le 18/08/2025).

145. [https://www.francetvinfo.fr/meteo/secheresse/secheresse-on-a-decrypte-quatre-idees-recues-sur-la-reutilisation-des-eaux-usees-traitees\\_5686637.html](https://www.francetvinfo.fr/meteo/secheresse/secheresse-on-a-decrypte-quatre-idees-recues-sur-la-reutilisation-des-eaux-usees-traitees_5686637.html) (consulté le 18/08/2025).

146. [https://www.liberation.fr/environnement/la-reutilisation-des-eaux-usees-le-vrai-faux-miracle-anti-secheresse-20230301\\_56EIG7YJC5GM5KTL5UU43CPV3Y](https://www.liberation.fr/environnement/la-reutilisation-des-eaux-usees-le-vrai-faux-miracle-anti-secheresse-20230301_56EIG7YJC5GM5KTL5UU43CPV3Y) (consulté le 18/08/2025).

147. [https://www.cerema.fr/system/files/documents/2020/07/2020\\_06\\_panorama\\_reut\\_pour\\_edition\\_vdef-1.pdf](https://www.cerema.fr/system/files/documents/2020/07/2020_06_panorama_reut_pour_edition_vdef-1.pdf) (consulté le 18/08/2025).

## Amélioration des réseaux

L'amélioration (ou le renouvellement) des réseaux (eau potable et assainissement) est une autre mesure intégrée au plan Eau du gouvernement, afin d'optimiser la disponibilité de l'eau sur les territoires<sup>148</sup>. En effet, la réduction des fuites sur les réseaux est une nécessité afin de sécuriser l'approvisionnement en eau potable et limiter autant que possible les prélèvements dans le milieu. L'objectif de cette mesure est d'éviter de perdre « inutilement » de l'eau avant même d'avoir pu la distribuer auprès des usagers — limitant ainsi les besoins de prélèvement. Dans le cas des réseaux d'assainissement, la réduction des fuites vise à la fois à limiter les risques de pollution (du fait de fuites d'eaux usées non traitées dans l'environnement) et à limiter l'effet drainant provoqué par les canalisations vieillissantes (les eaux d'assainissement n'ayant pas toujours un flux continu, il est parfois possible que l'eau du sol fuite à l'intérieur du réseau, contribuant ainsi à assécher le sol).

Cependant, cette solution s'adresse en priorité aux communes présentant des taux de fuites particulièrement élevés (supérieurs à 50 % notamment, alors que la moyenne nationale est de l'ordre de 20 %). Une des raisons à cela est que les travaux de réparation et de modernisation des réseaux sont généralement coûteux, nécessitant des investissements importants. Ces travaux sont également rendus difficiles du fait de la complexité technique de détecter correctement les fuites et de les réparer (compétences et outils disponibles). Pour cette raison, améliorer le rendement des réseaux d'eau par la réparation des fuites entraîne généralement une augmentation des coûts marginaux de distribution d'eau potable (Garcia, 2002). Dans le cas de communes disposant de taux de fuites peu élevés, il est ainsi généralement peu rentable pour les exploitants des services d'eau de chercher à améliorer la qualité des réseaux.

De plus, il est nécessaire de fortement nuancer l'effet quantitatif de cette mesure sur la disponibilité de l'eau sur le territoire. En effet, hormis la petite proportion captée puis évapotranspirée par le sol et la végétation, la grande majorité de l'eau qui fuit des réseaux d'eau potable vers le sol revient ensuite au milieu naturel (bien que parfois dans un milieu différent). La réduction des fuites peut néanmoins s'avérer utile, d'une part, afin de ne pas « gâcher » de l'eau potable (dont la production et distribution nécessitent de l'énergie) et, d'autre part, parce que la ressource en eau est rare dans certains territoires et à certaines périodes de l'année. La réparation des fuites au sein de l'assainissement semble en revanche plus intéressante lorsque certains réseaux agissent à la manière de drains, permettant de limiter l'assèchement des sols. Au final, le déploiement de cette mesure doit au préalable bien peser ses avantages et inconvénients pour planifier et mettre en œuvre des programmes de réduction des fuites de manière efficace et durable.

148. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/plan-daction-gestion-resiliente-concertee-leau> (consulté le 18/08/2025).

## Transferts d'eau entre territoires

Cette mesure vise, à l'aide d'ouvrages importants (canalisations, canaux...), à transférer de grandes quantités d'eau entre bassins versants, afin de répondre à des défis présents ou à venir (Arambourrou *et al.*, 2024). Ces transferts, pouvant intervenir sous différentes formes, visent à répondre à de multiples usages, tels que la production d'eau potable ou l'irrigation. Le but est ainsi de relier plusieurs systèmes de distribution d'eau entre eux (interconnexions entre les réseaux) pour créer un réseau intégré et flexible. Cela permet de partager les ressources, d'optimiser la gestion de l'eau et d'assurer un approvisionnement continu et fiable.

En France, ces transferts d'eau se retrouvent à différentes échelles. Tout d'abord, il peut s'agir d'interconnexions des réseaux d'eau potable à relativement petite échelle — par exemple entre différentes communes ou intercommunalités — permettant de se soutenir mutuellement en cas de crise. Ensuite, il peut s'agir de transferts à des échelles plus régionales, à l'image de l'aqueduc Vilaine-Atlantique visant à interconnecter le bassin rennais et le littoral<sup>149</sup>. Réversible, l'objectif de cet ouvrage est de répondre à la demande du littoral en été (lorsque la demande sur la métropole rennaise est plus faible) et de soulager la pression sur le bassin rennais en hiver (pour lui permettre de recharger ses stocks d'eau). C'est également le cas du canal de Marseille, qui dérive l'eau de la Durance pour alimenter en eau potable la ville de Marseille<sup>150</sup>. Bien que plus rares, certains ouvrages couvrent une échelle plus large encore, entre grands bassins hydrographiques, à l'image de l'aqueduc Aqua Domitia qui transfère des eaux du Rhône vers les territoires du Gard, de l'Hérault et de l'Aude, essentiellement pour la production d'eau potable et l'irrigation (Ruf, 2012). Actuellement, un projet vise à étendre cet ouvrage jusque dans les Pyrénées-Orientales<sup>151,152</sup>.

Les transferts d'eau peuvent s'avérer intéressants afin de pallier des situations tendues, dans le cas où d'autres territoires disposent de ressources suffisamment abondantes — permettant de subvenir à l'ensemble de leurs besoins (écosystèmes et usages anthropiques) tout en pouvant exporter une partie excédentaire. Cependant, cette solution impose que le bassin versant d'origine soit effectivement excédentaire en eau, dans la mesure où les eaux ainsi transférées constituent le plus souvent une perte nette pour le milieu émetteur. De manière générale, il semble plus judicieux de ne pas dépendre totalement d'autres territoires pour des besoins de première

149. <https://www.ouest-france.fr/bretagne/ille-et-vilaine/de-ferel-a-rennes-laqueduc-atlantique-vilaine-va-securiser-lapprovisionnement-en-eau-71e1d5ce-2f06-11ef-9d8b-818edcab8630> (consulté le 18/08/2025).

150. <https://www.eauxdemarseille.fr/histoires-deaux/8-le-canal-de-marseille-un-chantier-titanesque> (consulté le 18/08/2025).

151. <https://www.latribune.fr/economie/france/une-aqueduc-du-rhone-a-perpignan-la-secheresse-historique-dans-les-pyrenees-orientales-relance-le-debat-994185.html> (consulté le 18/08/2025).

152. [https://www.francetvinfo.fr/replay-radio/le-choix-franceinfo/reportage-quand-elle-est-arrivee-c-etait-le-bonheur-l-eau-du-rhone-acheminee-par-le-reseau-aqua-domitia-va-t-elle-sauver-les-pyrenees-orientales-de-la-secheresse\\_6490670.html](https://www.francetvinfo.fr/replay-radio/le-choix-franceinfo/reportage-quand-elle-est-arrivee-c-etait-le-bonheur-l-eau-du-rhone-acheminee-par-le-reseau-aqua-domitia-va-t-elle-sauver-les-pyrenees-orientales-de-la-secheresse_6490670.html) (consulté le 18/08/2025).

nécessité dont l'eau fait partie. Le risque de ce type d'approche est de donner l'illusion de pouvoir toujours aller trouver de l'eau ailleurs lorsqu'elle viendrait à manquer localement. Or, comme cela fut le cas lors de la sécheresse de 2022, cette solution rencontre toutes ses limites à partir du moment où tous les territoires sont en déficit.

Ces transferts d'eau entre territoires peuvent par ailleurs se retrouver limités compte tenu de leur coût et de leur faible acceptabilité sociale. Par exemple, le projet initial de l'aqueduc Aqua Domitia visait à transférer les eaux du Rhône jusqu'à Barcelone, mais fut abandonné en partie pour des raisons de blocages sociaux et politiques (Barraqué, 2000). Ce type de mesure questionne également directement les relations de solidarité, par exemple entre ville et campagne — les grandes métropoles ayant tendance à aller chercher toujours plus loin les ressources nécessaires à l'alimentation en eau potable de leur population croissante. Plus largement, la logique du transfert met en veille celle des solidarités amont-aval sur l'ensemble des problématiques de l'eau (Ruf, 2015). Ainsi, cette approche est avant tout intéressante afin de permettre plus de flexibilité entre territoires, dans le cas où la solidarité se fait de manière temporaire et réversible (dans les deux sens), au sein de territoires ne présentant pas de vulnérabilités aux mêmes moments de l'année. Néanmoins, il est nécessaire que cette solution soit bien adaptée au contexte du territoire et intégrée au sein d'une approche plus globale de planification, en prenant également en compte les alternatives existantes.

## Retenues collinaires

Les retenues collinaires sont des ouvrages de stockage de l'eau principalement remplis par ruissellement des eaux de surface (à la différence des réserves de substitution) et déconnectés du réseau hydrographique (à la différence des barrages sur cours d'eau)<sup>153</sup>. Généralement constitués de digues en terre ou maçonnées, ces ouvrages visent à retenir les eaux de ruissellement et à en stocker une partie au sein de cuvettes naturelles (dans des thalwegs sans écoulement permanent) ou artificielles. Leur développement est à la fois lié au potentiel topographique (pente) et à la nature du sol qui suppose la présence d'un minimum d'argile (afin que l'eau retenue ne s'infiltre pas trop dans les nappes). En France, ces retenues servent principalement à l'irrigation des cultures, bien qu'elles puissent également être utilisées pour d'autres usages (eau potable, neige de culture...).

Comme discuté plus haut, dans la section « La création de stockages artificiels », l'impact hydrologique de ce type d'ouvrages est relativement variable selon les circonstances. Si la plupart des retenues collinaires sont des petits ouvrages, leur effet cumulé (lorsque de nombreuses retenues sont installées dans un même bassin versant) peut

153. <https://www.ouest-france.fr/economie/agriculture/gestion-de-leau-les-retenues-collinaires-mieux-que-les-bassines-d63c2334-c7d4-11ed-80c7-e23fofe16482> (consulté le 18/08/2025).



néanmoins conduire à une dégradation en quantité et en qualité des ressources en eau (Carluer *et al.*, 2017 ; Habets *et al.*, 2018). Pour cette raison, la priorité est de stocker au maximum l'eau dans les sols et les nappes souterraines à l'échelle du bassin versant. Seuls ces stockages naturels permettent à la fois de retenir l'eau sur le territoire lors des périodes humides (pour la relâcher ensuite en période plus sèche), tout en préservant sa qualité et sans impacter la biodiversité. De plus, la capacité de stockage des retenues collinaires (même en les cumulant) est généralement infiniment plus faible que ce que permettent les sols et les nappes.

Pour autant, cela ne signifie pas que les retenues collinaires devraient être totalement ignorées dans les questions d'adaptation des territoires face aux bouleversements environnementaux. Cette solution doit cependant être pensée au cas par cas en fonction des territoires et de leurs spécificités (Carluer *et al.*, 2025). En effet, certains territoires présentent des caractéristiques locales ne permettant parfois pas de maximiser autant que d'autres le stockage de l'eau dans les sols et les nappes souterraines (type de sol, géologie...). Ainsi, sur ces territoires, la mise en place de retenues collinaires pourrait être une réponse adaptée, une fois que toutes les solutions de stockage fondées sur les sols et les nappes souterraines auraient déjà été déployées.

Également, une perception courante est que toute eau issue des précipitations ruisselant ensuite dans les cours d'eau serait « perdue ». Or, si ce sentiment d'eau « perdue » peut sembler en partie fondé dans le cas de zones littorales (les eaux de ruissellement se jetant ensuite dans la mer), il s'avère relativement infondé dans le cas de zones continentales où les eaux de ruissellement alimentent en suivant tout le reste du bassin versant (ne ruisselant pas intégralement jusqu'à la mer, mais rejoignant également en partie les sols, les nappes souterraines ou les zones humides). Aussi, la mise en place de retenues collinaires en zone littorale peut éventuellement présenter un certain intérêt, tant qu'elle ne contribue pas à réduire de manière trop significative les apports d'eau douce (ainsi que de sédiments et d'éléments chimiques) dont dépendent certains écosystèmes marins côtiers. En revanche, en zone continentale, à moins que l'objectif des retenues soit de soutenir les débits d'étiage, ces stockages (en particulier s'ils sont destinés à l'irrigation agricole) constituent généralement une perte d'eau pour les territoires en aval.

Ces dernières années, les projets de retenues collinaires ont souvent fait l'objet de vives contestations, à l'image d'un projet de retenue pour la production de neige artificielle sur la commune de La Clusaz<sup>154</sup>. Dans ce contexte, plutôt qu'un caricatural positionnement « pour » ou « contre » l'utilisation de retenues collinaires, il semblerait plus judicieux de se poser la question des usages auxquels ces ouvrages visent à répondre (soutien d'étiage, agriculture intensive, tourisme...). Ce sujet questionne notamment, de manière plus globale, nos choix de société en matière de mode de vie

154. [https://www.lemonde.fr/planete/article/2022/10/20/a-la-clusaz-une-zad-contre-la-neige-artificielle\\_6146621\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2022/10/20/a-la-clusaz-une-zad-contre-la-neige-artificielle_6146621_3244.html) (consulté le 18/08/2025).

et de consommation (modèle agricole, modèle touristique, urbanisme...), renvoyant ainsi à de nombreux leviers d'action présentés précédemment qu'il est nécessaire de penser en parallèle (solutions sociales et solutions fondées sur la nature). La mise en place de ce type de solution technique doit ainsi s'intégrer au sein d'approches plus globales de transition à l'échelle des territoires. Ce qui est certain, c'est qu'un changement complet de modèle (agricole, touristique...) est de toute manière difficilement opérable sur une courte durée, plusieurs décennies ayant été nécessaires à la mise en place des filières actuelles.

Au final, la question de l'utilisation de ce type de solution technique pourrait se poser dans le but d'accompagner l'ensemble des acteurs impliqués dans cette transition — fournissant une forme de « parachute » (ou d'amortisseur) afin de permettre une transition plus en douceur. En revanche, si le déploiement de ces retenues collinaires ne s'inscrit pas dans une approche plus globale de transition, le risque est que ces ouvrages pérennisent des pratiques mal adaptées à l'évolution du contexte hydroclimatique sur les territoires (maladaptation). De plus, de la même manière que pour la REUT, il est crucial d'éviter un effet rebond et l'illusion de disposer d'une ressource en eau supplémentaire qui pourrait encourager de nouveaux usages et aggraver la sécheresse à l'échelle du bassin versant. Ces aspects sont d'ailleurs discutés plus en détail dans la section suivante concernant les réserves de substitution, qui soulèvent des questions similaires — bien que les retenues collinaires semblent « globalement mieux acceptées »<sup>155</sup>. Dans tous les cas, un juste équilibre reste à trouver, les retenues collinaires pouvant également parfois avoir leur rôle à jouer dans la transition des territoires.

## Réserves de substitution

Contrairement aux retenues collinaires présentées précédemment, les réserves de substitution ne se remplissent pas à partir des eaux de ruissellement. Il s'agit de réservoirs creusés et terrassés, généralement de grandes tailles (d'où leur surnom de « méga-bassines »), dont le fond est bâché à l'aide d'un film étanche (afin que l'eau ne s'infiltre pas dans les sols), et qui sont remplis par pompages (principalement dans les nappes souterraines). Ces spécificités permettent ainsi de répondre à la difficulté, dans certains territoires, de mettre en œuvre d'autres types de stockages artificiels — par exemple là où le contexte géologique implique majoritairement une circulation de l'eau en profondeur, rendant compliqué le stockage de l'eau issue du ruissellement (comme c'est notamment le cas au sud du département des Deux-Sèvres, illustré en figure 2.4). Le terme « substitution » désigne le fait de prélever de l'eau lorsque les nappes sont à un niveau haut (en période hivernale), pour ensuite la stocker à l'air libre et l'utiliser en substitution (ou réduction) de prélèvements (dans les rivières ou les nappes) en

155. <https://www.senat.fr/rap/r22-142/r22-1421.pdf> (consulté le 18/08/2025).

période estivale. Actuellement, ces ouvrages ont principalement pour objectif de soutenir l'irrigation agricole. La création des réserves de substitution vise ainsi à réduire les tensions sur les cours d'eau et les nappes en période sensible (généralement en période estivale), tout en permettant aux agriculteurs de disposer des mêmes quantités d'eau. La réserve d'eau est ainsi remplie en période hivernale, en dehors des périodes de tensions exercées sur la ressource, ce qui est une manière de « transformer un flux de ressource en un stock » (Montginoul et Erdlenbruch, 2009).

## ■ Les avantages

Indéniablement, les réserves de substitution présentent un certain nombre d'avantages. Tout d'abord, pour l'environnement, elles permettent (théoriquement) de diminuer les prélèvements dans le milieu naturel en période estivale — limitant ainsi l'aggravation des étiages des cours d'eau ou la baisse des nappes. Ensuite (et surtout), pour les agriculteurs y étant raccordés, elles permettent de sécuriser l'apport d'eau pour leurs exploitations, là où les prélèvements traditionnels (dans les eaux de surface ou les nappes) pouvaient se montrer moins prévisibles du fait d'une accentuation des restrictions (restrictions d'ordre physique dépendant du climat et restrictions d'ordre administratif *via* les réglementations en découlant). Disposer d'une réserve de substitution permet ainsi de ne pas être soumis aux arrêts sécheresse (limitations temporaires des usages), dans la mesure où l'eau des retenues est déconnectée des cours d'eau et des nappes (le prélèvement dans le milieu est ainsi comptabilisé pendant la période de remplissage hivernale et non pendant la période d'étiage). Dans ce cas, seuls les agriculteurs non raccordés à des réserves de substitution et n'ayant pas renoncé à leurs prélèvements dans le milieu naturel sont impactés par ces restrictions. Ce dispositif permet ainsi de grandement sécuriser les exploitants — le volume d'eau disponible étant connu par avance et n'étant soumis ni aux exigences d'organismes de gestion ni aux arrêts sécheresse. Cette solution offre également de nouvelles opportunités vers des cultures plus rentables comme le maïs.

## ■ Les inconvénients

Ces retenues ne sont cependant pas exemptes d'inconvénients et se voient de plus en plus contestées<sup>156</sup>. Faisant régulièrement la une de nombreux médias, cette contestation a ainsi connu son paroxysme en mars 2023, lors d'une manifestation organisée en opposition à la construction d'une réserve de substitution sur la commune de Sainte-Soline dans les Deux-Sèvres<sup>157</sup>. À l'opposé d'une prise en compte de la rareté de l'eau — à travers des incitations à l'économie et à la réduction des prélèvements

156. [https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/03/25/autour-des-megabassines-deux-visions-s'affrontent-sur-le-partage-de-l-eau\\_6166910\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/03/25/autour-des-megabassines-deux-visions-s'affrontent-sur-le-partage-de-l-eau_6166910_3244.html) (consulté le 18/08/2025).

157. [https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/03/26/megabassines-a-sainte-soline-une-mobilisation-massive-et-marquee-par-de-violents-affrontements\\_6166990\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/03/26/megabassines-a-sainte-soline-une-mobilisation-massive-et-marquee-par-de-violents-affrontements_6166990_3244.html) (consulté le 18/08/2025).

— le recours planifié aux réserves de substitution serait vu comme une manière d’effacer ce manque saisonnier, en perpétuant une représentation de « l’abondance » de l’eau hivernale (Carrausse, 2022). Dans ce contexte, le sujet des réserves de substitution est devenu assez polémique, le rendant relativement difficile à traiter de manière concise. Pour autant, l’objectif de cet ouvrage est de tenter de nuancer autant que possible les éléments qui en ressortent. À nouveau, tout l’enjeu est de tenter de s’extraire de toute posture caricaturale — opposant le « pour » et le « contre » —, afin de trouver des solutions adaptées à chaque territoire.

Tout d’abord, au même titre que l’ensemble des autres stockages artificiels, les réserves de substitution sont connues pour entraîner un certain nombre d’impacts hydrologiques (ceux-ci ayant déjà été discutés plus en détail plus haut, à la section « La création de stockages artificiels ») (Carluet *et al.*, 2017 ; Habets *et al.*, 2018). Pourtant, début 2023, les partisans de ce type d’ouvrage (l’État en particulier) mettaient plutôt en avant un « effet positif » des réserves de substitution sur l’hydrologie des bassins versants (niveau des nappes et débits des cours d’eau)<sup>158</sup>, s’appuyant notamment sur un rapport publié en juin 2022 par le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM ; Abasq, 2022). En effet, d’après cette étude (basée sur une approche de modélisation), sur la période 2000-2011 étudiée (correspondant à la période sur laquelle le modèle avait été initialement calé), la mise en place de réserves de substitution se traduisait par une diminution des débits des cours d’eau et des niveaux de nappe durant la période hivernale (du fait des pompages), au bénéfice d’une augmentation en période d’étiage.

Cependant, cette étude présente de nombreuses limites ayant contribué à fortement contester ses conclusions<sup>159,160</sup>, telles que l’absence d’évaluation par des pairs (base de tout travail de recherche scientifique), la pertinence du modèle utilisé ou la fenêtre temporelle choisie<sup>161,162</sup>. La période choisie (2000-2011), en particulier, est assez problématique, dans la mesure où elle ne permet pas d’intégrer l’évolution climatique récente et encore moins de prendre en compte les changements futurs. Or la récurrence des sécheresses, telle que nous l’observons depuis une dizaine d’années, n’est pas du tout prise en compte dans les simulations. Se pose alors la question de la pérennité, à plus ou moins long terme (10-15 ans), de ce type d’ouvrages si les territoires se retrouvent confrontés à des répétitions de sécheresses estivales puis hivernales (c’est-à-dire de sécheresses pluriannuelles, ce que l’évolution climatique pourrait rendre plus fréquent). Ce cas de figure correspond d’ailleurs à l’expérience

158. [https://www.lemonde.fr/idees/article/2023/01/15/megabassines-le-fantasme-d-une-ressource-en-eau-eternellement-disponible\\_6157924\\_3232.html](https://www.lemonde.fr/idees/article/2023/01/15/megabassines-le-fantasme-d-une-ressource-en-eau-eternellement-disponible_6157924_3232.html) (consulté le 18/08/2025).

159. [https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/02/02/dans-la-sevre-niortaise-l-expertise-sur-les-megabassines-contestee\\_6160232\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/02/02/dans-la-sevre-niortaise-l-expertise-sur-les-megabassines-contestee_6160232_3244.html) (consulté le 18/08/2025).

160. <https://www.ladepeche.fr/2023/03/29/decryptage-mega-bassines-pourquoi-le-rapport-scientifique-brandi-par-les-pro-bassines-est-remis-en-cause-11094747.php> (consulté le 18/08/2025).

161. [https://soulevements.cdn.prismic.io/soulevements/5e589203-205f-456b-8de6-04cc20fb5ba7\\_Synth%C3%A8se-conf-de-presse.pdf](https://soulevements.cdn.prismic.io/soulevements/5e589203-205f-456b-8de6-04cc20fb5ba7_Synth%C3%A8se-conf-de-presse.pdf) (consulté le 18/08/2025).

162. <https://jonathanschuite.fr/2022/11/21/pourquoi-les-rapports-du-brgm-sur-limpact-des-megabassines-en-poitou-charentes-doivent-etre-remis-en-question> (consulté le 18/08/2025).

vécue en 2022-2023, conduisant déjà à des tensions concernant le remplissage de certaines réserves de substitution.

Au final, dès février 2023, le BRGM lui-même, dans un communiqué de presse, rappelait les limites de leur étude : « L'expertise réalisée par le BRGM n'est pas une étude approfondie ni une étude d'impact de toutes les conséquences possibles des prélèvements d'eau envisagés. Il ne s'agit pas non plus d'un article de recherche scientifique soumis à l'évaluation de la communauté scientifique. Il s'agit d'une étude répondant à une commande précise, donnant lieu à un rapport technique permettant de répondre aux questions posées avec les limites associées.<sup>163</sup> » Notamment, la question posée était la suivante : si les réserves de substitution (actuellement en projet) avaient été construites durant la décennie 2000-2010, est-ce qu'il y aurait eu une amélioration des débits des cours d'eau en été ? Aussi, cette étude n'informe que sur l'impact qu'auraient eu ces ouvrages dans un monde qui n'existe (et n'existera vraisemblablement) plus.

Ce qui est en cause n'est ainsi pas le rapport de l'organisme public (BRGM), mais le mésusage de l'expertise qui en est fait (par les pouvoirs publics notamment). Pour éclairer l'action, il est nécessaire de poser les questions appropriées, le risque étant sinon d'être maintenu dans l'ignorance confortable des conséquences des décisions<sup>164</sup>. Dans son communiqué, le BRGM reconnaît d'ailleurs que « la prise en compte des évolutions climatiques, non simulée dans l'étude, est importante ». Se pose donc toujours la question de l'impact de ces ouvrages dans le monde à venir — qui sera vraisemblablement marqué par une diminution de la recharge des nappes souterraines (du fait de l'irrégularité des précipitations, de l'assèchement et l'appauvrissement biologique des sols...), pouvant être aggravée par le renforcement de l'évaporation de l'eau stockée en surface (sous l'effet de l'augmentation générale des températures).

Une autre limite est que si, à l'échelle estivale, la présence de réserves de substitution a permis de limiter certains prélèvements dans le milieu naturel, en revanche, à l'échelle annuelle, elle s'est généralement traduite par une augmentation des usages de l'eau (Montginoul et Erdlenbruch, 2009). C'est notamment pour cette raison qu'en juillet 2024 un tribunal administratif a décidé de réduire de près d'un quart les prélèvements autorisés pour l'irrigation agricole dans le Marais poitevin, jugeant « excessifs » ceux précédemment autorisés<sup>165</sup>. En effet, la création de ces ouvrages n'incite pas à la mise en place de mesures d'économie d'eau. Pire, en offrant aux agriculteurs de nouvelles opportunités vers des cultures plus rentables comme le maïs, les réserves ont parfois même conduit à une augmentation des superficies irriguées qui, elles-mêmes, viennent légitimer la création de nouvelles réserves (« effet rebond »). Cette inquiétude

163. <https://www.brgm.fr/fr/actualite/communiqu%C3%A9-presse/expertise-brgm-projet-reserves-substitution-deux-sevres-note> (consulté le 18/08/2025).

164. [https://www.lemonde.fr/idees/article/2023/01/15/megabassines-le-fantasma-d-une-ressource-en-eau-eternellement-disponible\\_6157924\\_3232.html](https://www.lemonde.fr/idees/article/2023/01/15/megabassines-le-fantasma-d-une-ressource-en-eau-eternellement-disponible_6157924_3232.html) (consulté le 18/08/2025).

165. <https://www.20minutes.fr/societe/4100456-20240709-marais-poitevin-justice-reduit-volumes-irrigation-cause-megabassines> (consulté le 18/08/2025).

concernant un risque de « fuite en avant dans la voie de l'irrigation » était d'ailleurs évoquée dès les premières expertises datant de la fin des années 1990, au moment où cette solution technique commençait seulement à être envisagée (Simon, 1998).

Il convient également de mentionner que les réserves de substitution, bien que de façon marginale, contribuent également à impacter indirectement le cycle hydrologique du fait de l'imperméabilisation des sols qu'elles entraînent. En effet, leur construction nécessite de terrasser et bâcher (donc d'imperméabiliser) des parties du territoire (parfois sur une dizaine d'hectares). Enfin, une des grosses critiques de cette solution est qu'elle est particulièrement coûteuse pour la collectivité — les réserves bénéficiant généralement de financements publics (jusqu'à 70 voire 80 % du coût total investi), octroyés en grande partie par l'agence de l'Eau (Montginoul et Erdlenbruch, 2009 ; Carrausse, 2022).

### **■ Une solution au cas par cas, au sein d'approches de transition plus globales**

Malgré leurs limites, les réserves de substitution, au même titre que les retenues collinaires, sont à envisager au sein de la myriade de solutions possibles pour adapter les territoires aux pressions climatiques et anthropiques. Plutôt que d'être « la » solution, elles peuvent (dans certains contextes et sous certaines conditions) constituer « une » solution au problème. La question de leur utilité peut en effet se poser dans le cas de territoires pour lesquels le stockage de l'eau dans les sols et les nappes est compliqué (en zone littorale par exemple, comme déjà évoqué pour les retenues collinaires). Dans certains territoires, un stockage de l'eau durant l'hiver pourrait ainsi s'avérer relativement intéressant. Leur déploiement doit également dépendre du dimensionnement de chaque réserve au regard de ce que l'hydrologie locale est capable de fournir. Mais surtout, l'élément central qu'il est nécessaire de questionner concerne les usages auxquels ces ouvrages visent à répondre : production de céréales destinées à l'export sur les marchés mondiaux, production plus locale (par exemple, permettant l'autonomie fourragère indispensable à l'équilibre économique de certaines exploitations en polyculture-élevage), maraîchage en agriculture biologique...

Aussi, de manière plus large, ce sujet questionne directement les pratiques agricoles actuellement mises en œuvre<sup>166</sup>, renvoyant, à nouveau, à de nombreux leviers d'action présentés précédemment qu'il est nécessaire de penser en parallèle (solutions sociales et fondées sur la nature). La mise en place de ce type de solution technique doit ainsi s'intégrer au sein d'approches plus globales de transition à l'échelle des territoires (Carluier *et al.*, 2025). Cette transformation des systèmes agricoles doit viser à augmenter leur capacité d'adaptation, afin de gagner en agilité face aux évolutions actuelles et à venir. À ce titre, comme d'autres solutions techniques, les réserves de

166. [https://www.lemonde.fr/idees/article/2024/07/20/megabassines-il-existe-des-pratiques-agricoles-qui-permettent-aux-paysans-de-se-premunir-contre-le-manque-d-eau-sans-avoir-recours-a-l-irrigation-6253183\\_3232.html](https://www.lemonde.fr/idees/article/2024/07/20/megabassines-il-existe-des-pratiques-agricoles-qui-permettent-aux-paysans-de-se-premunir-contre-le-manque-d-eau-sans-avoir-recours-a-l-irrigation-6253183_3232.html) (consulté le 18/08/2025).

substitution pourraient servir de « parachute » permettant d'accompagner les agriculteurs vers une transition agroécologique. C'est d'ailleurs en partie l'ambition affichée par les institutions, à l'image d'un rapport produit en 2020 conjointement entre le Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD) et le Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux (CGAAER)<sup>167</sup>. Dans ses conclusions, la mission du CGEDD et du CGAAER ne s'oppose pas au « renforcement de la ressource en eau pour l'irrigation », mais à condition qu'elle se fasse « dans le respect du renouvellement de la ressource et du bon état des milieux ». De plus, elle recommande qu'elle s'accompagne d'une transformation du modèle agricole vers l'agroécologie (« plus économe en eau et protecteur des sols »), « en faisant des sols le socle de la stratégie d'adaptation de l'agriculture au changement climatique »<sup>168</sup>.

Cette ambition s'observe également à travers le protocole d'accord qui avait été signé dans les Deux-Sèvres en décembre 2018<sup>169</sup>, et qui visait à assujettir le déploiement de 16 réserves de substitution à un engagement en matière d'évolution des pratiques agricoles, en parallèle de leur intégration au sein d'un « projet de territoire » : le Contrat territorial de gestion quantitative (CTGQ) Sèvre niortaise - Mignon<sup>170</sup>. En mai 2024, les services de l'État se montraient ainsi relativement optimistes (parlant de « réelles avancées »)<sup>171</sup> à la suite d'une réunion de la Commission d'évaluation et de surveillance (instance chargée du suivi du protocole d'accord)<sup>172</sup>. Les chiffres affichés indiquaient que la surface cultivée en maïs avait été réduite de 22 % entre 2018 et 2022, et que la surface cultivée en agriculture biologique avait augmenté de 48 % sur la même période. Cependant, ces chiffres nécessitent d'être nuancés, dans la mesure où les données utilisées englobaient l'intégralité des exploitations du bassin et pas uniquement les irrigants raccordés aux réserves de substitution<sup>173</sup>. Aussi, ces données générales sont à décorrélérer de la mise en service des réserves de substitution et ne traduisent pas nécessairement d'évolution dans les pratiques des irrigants.

Le problème est qu'à l'heure actuelle ce type de protocole semble principalement basé sur les incitations, mais ne contient pas de mesures réellement contraignantes (prescriptives) ou avec des objectifs environnementaux. Les agriculteurs s'engagent juste à faire évoluer leurs pratiques, mais il existe peu de garanties que cet engagement

167. <https://agriculture.gouv.fr/rapport-du-cgaaer-cgedd-changement-climatique-eau-et-agriculture-dici-2050> (consulté le 18/08/2025).

168. *Ibid.* (consulté le 18/08/2025).

169. <https://www.deux-sevres.gouv.fr/contenu/telechargement/28454/222649/file/18-12-18%20Protocole%20avec%20signatures%20AccordbassinSevreniortaiseMignon.pdf> (consulté le 18/08/2025).

170. <https://aides-redevances.eau-loire-bretagne.fr/home/aides/collectivites/les-premiers-contrats-territoriaux/contrat-territorial-sevre-niortaise-et-mignon.html> (consulté le 18/08/2025).

171. <https://www.ouest-france.fr/environnement/eau/de-reelles-avancees-constatees-dans-le-cadre-du-protocole-autour-de-la-creation-de-bassines-f62b55fa-0a0b-11ef-943a-cd1e31449f57> (consulté le 18/08/2025).

172. <https://www.deux-sevres.gouv.fr/Actions-de-l-Etat/Environnement-eau-risques-naturels-et-technologiques/Projet-de-construction-de-reserves-de-substitution-bassin-versant-Sevre-Niortaise-et-Mignon/La-commission-d-evaluation-et-de-surveillance/Seance-du-03-mai-2024> (consulté le 18/08/2025).

173. <https://www.ouest-france.fr/environnement/eau/bassines-quand-les-chiffres-de-la-prefecture-des-deux-sevres-enjolivent-la-realite-17d65912-1032-11ef-993c-f37c0160a6dd> (consulté le 18/08/2025).

sera respecté, ni sur quelle temporalité. Or, jusqu'à présent en tout cas, l'expérience a montré que les incitations à faire évoluer les pratiques (« désirrigation », diversification des cultures, baisse des prélèvements en eau...) n'avaient été que très peu suivies par les agriculteurs (Binet *et al.*, 2009 ; Carrausse, 2022). Ce constat rejoint d'ailleurs, en partie, les conclusions du rapport annuel 2021 de l'Autorité environnementale<sup>174</sup>, qui soulignait l'inefficacité des plans et outils ayant été expérimentés jusqu'alors à l'échelle nationale afin de remédier de manière tangible aux impacts négatifs des activités agricoles<sup>175</sup>.

Face à ce problème, plutôt que de rejeter totalement l'utilisation d'outils techniques tels que les réserves de substitution, il semblerait plus judicieux — là où ces ouvrages s'avèrent adaptés — d'accompagner leur déploiement d'objectifs plus clairs et de moyens de suivi et de contrôle efficaces. Il est également nécessaire de bien définir les seuils (hauteurs de nappe) à partir desquels les prélèvements peuvent être autorisés sans que cela impacte trop le milieu naturel. Cela doit être défini au cas par cas, à partir d'études hydrogéologiques caractérisant le contexte local (géologie, interconnexions avec les cours d'eau...). Le respect de ces seuils est d'ailleurs clairement spécifié dans une décision de la Cour administrative d'appel de Bordeaux (datant de décembre 2024) concernant la construction de réserves dans les bassins de la Sèvre niortaise et du Mignon<sup>176</sup>. En plus du contrôle permettant de s'assurer des changements de pratiques sur le long terme (transition agroécologique), il est également nécessaire de s'assurer du bon respect des seuils autorisés pour les prélèvements hivernaux, sinon le risque est que ces seuils ne soient pas respectés, en particulier dans le cas d'hivers particulièrement secs où il ne serait normalement pas possible de prélever d'eau.

En outre, il semble opportun de rappeler que le modèle agricole actuel s'est en partie construit du fait de nombreux facteurs touchant l'ensemble de la société. Il serait donc relativement « injuste » de faire porter au monde agricole seul toute la responsabilité du changement. Pour faciliter cette transformation, tout l'enjeu serait d'encourager et soutenir encore davantage son engagement dans cette transition agroécologique. Aussi, en parallèle du déploiement de réserves de substitution, cette évolution des pratiques agricoles doit intégrer de nombreux autres leviers. Par exemple, il pourrait être utile de mettre en place une évolution de la valorisation des productions agricoles, qui prenne en compte les bénéfices collectifs qu'elles apportent (renvoyant notamment à la question des paiements pour services environnementaux évoqués précédemment). Il pourrait également être utile de mettre en place des outils juridiques et fonciers qui facilitent les changements d'usage et de bénéficiaires des infrastructures agricoles existantes

174. <https://www.vie-publique.fr/rapport/284913-rapport-annuel-2021-de-lautorite-environnementale> (consulté le 18/08/2025).

175. <https://revue-sesame-inrae.fr/vous-avez-dit-transition-agroecologique-chronique-dune-crise-annoncee> (consulté le 18/08/2025).

176. <https://bordeaux.cour-administrative-appel.fr/decisions-de-justice/dernieres-decisions/contentieux-des-bassines-dans-le-bassin-de-la-sevre-niortaise-mignon-quatre-reserves-dont-celle-de-sainte-soline-sont-illegales-en-l-absence-de> (consulté le 18/08/2025).



ou futures. Ces évolutions pourraient s'accompagner de nouveaux dispositifs d'assurance, permettant de couvrir à la fois les risques hydroclimatiques futurs et les risques découlant des transformations dans lesquelles les agriculteurs s'engagent. Un équilibre approprié entre ces deux types de risques serait néanmoins crucial pour éviter que les dispositifs d'assurance ne deviennent contre-productifs et n'entravent les changements. Concernant les aspects financiers, l'évolution des pratiques repose de plus, en partie, sur la réduction des investissements nécessitant des durées d'amortissement trop longues, afin d'éviter les risques de verrouillages sociotechniques.

Au final, les réserves de substitution, au même titre que les retenues collinaires, doivent être envisagées au sein d'une approche systémique et être adaptées localement (dans leur dimensionnement, leur situation, leur mode de remplissage...). Le risque est que, si le déploiement de cette solution ne s'inscrit pas dans une approche plus globale de transition, ces ouvrages contribuent uniquement à pérenniser des pratiques mal adaptées à l'évolution du contexte hydroclimatique sur les territoires (maladaptation)<sup>177</sup>. Il est également indispensable d'éviter tout nouvel effet rebond et le fantasme de disposer d'une ressource en eau éternellement disponible<sup>178</sup>, ce qui pourrait encourager de nouveaux usages et aggraver la sécheresse à l'échelle du bassin versant<sup>179</sup>. Cette précaution est d'autant plus importante qu'en l'état actuel des connaissances il n'est même pas garanti que cette solution reste viable chaque année à moyen terme (15-20 ans). Alors que la situation de sécheresse vécue en 2022-2023 pourrait devenir récurrente dès les années 2040-2050, se pose la question de la pérennité des exploitations agricoles si elles n'ont pas fait évoluer leurs pratiques vers des cultures moins gourmandes en eau (en particulier dans le cas de sécheresses pluriannuelles). Dans ce contexte, la bonne recette est à trouver pour chaque territoire.

## Recharge artificielle des nappes

La recharge artificielle des nappes (également nommée « recharge maîtrisée des aquifères ») désigne un ensemble de techniques visant à augmenter les volumes disponibles d'eau souterraine en favorisant, par des moyens artificiels (c'est-à-dire pilotés par l'action humaine), son infiltration jusque dans les aquifères (Asano, 2016). La recharge artificielle fait généralement appel à des installations et des approches assez différentes suivant l'origine de l'eau utilisée (cours d'eau, lacs ou réservoirs, eaux pluviales, eaux de stations d'épuration) et les spécificités locales (les conditions hydrogéologiques notamment) (Zhang *et al.*, 2020). Les approches de recharge

177. <https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/2024-03/20240312-RPA-2024-ENPA-adaptation-cultures-cerealières.pdf> (consulté le 18/08/2025).

178. <https://revue-sesame-inrae.fr/vous-avez-dit-transition-agroecologique-chronique-dune-crise-annoncee> (consulté le 18/08/2025).

179. <https://bonpote.com/les-mega-bassines-sont-elles-des-solutions-viables-face-aux-secheresses> (consulté le 18/08/2025).

artificielle peuvent notamment être séparées en deux grandes catégories : la recharge directe et la recharge indirecte.

Tout d'abord, les techniques de recharge directe (plus couramment utilisées dans le monde) visent, à l'aide de puits spécialement conçus, à injecter de l'eau depuis la surface directement dans des aquifères en profondeur. Cette méthode permet en particulier de recharger les nappes captives profondes, ce qui permet à l'eau injectée d'être protégée des intrusions éventuelles d'eau polluée issue d'aquifères plus proches de la surface. Les techniques de recharge indirecte (plus utilisées en France), quant à elles, visent à exploiter un ensemble d'ouvrages permettant de favoriser l'infiltration de l'eau, de la même manière que pour la recharge naturelle. Une des méthodes les plus répandues consiste à utiliser des bassins d'infiltration naturels ou artificiels, où l'eau est stockée temporairement pour ensuite recharger lentement l'aquifère. D'autres méthodes (moins utilisées) consistent à exploiter une berge d'infiltration directement en contact avec un cours d'eau. Ces approches indirectes peuvent également faire appel à l'utilisation de canaux creusés, permettant à l'eau de s'écouler et de s'infiltrer dans le sol sur une plus grande surface, ou encore se faire à travers une filtration de surface *via* des dunes superposées en escalier.

Le but de cette solution étant, dans le cas de la recharge indirecte, de s'appuyer sur le principe naturel d'infiltration de l'eau, elle est parfois considérée comme une solution fondée sur la nature. Cependant, son besoin d'infrastructures (plutôt que de s'appuyer sur les écosystèmes) et ses bénéfices limités pour la biodiversité (hormis le fait d'améliorer le stockage de l'eau qui pourra ensuite soutenir les étiages) la rapprochent plus de la catégorie des solutions techniques. En revanche, suivant les sources d'eau mobilisées, cette solution permet de faire le lien avec certaines solutions évoquées précédemment (y compris des solutions fondées sur la nature). Un rapprochement est notamment assez flagrant avec l'approche des « villes perméables » et la gestion des eaux pluviales. L'utilisation de bassins d'infiltration, de noues et de fossés — afin de ralentir les eaux pluviales et leur permettre de s'infiltrer dans les sols — correspond également à une forme de recharge artificielle des aquifères. De même, certaines approches de « réutilisation des eaux usées » visent à permettre leur infiltration dans les sols pour être stockées dans les aquifères. Si l'objectif est généralement d'améliorer la qualité de l'eau au passage — afin de pouvoir la réutiliser notamment pour la production d'eau potable — il n'en demeure pas moins qu'elle fait également appel à une forme de recharge artificielle des nappes.

Bien qu'étant utilisée depuis plusieurs décennies, la recharge artificielle des nappes est généralement encore peu connue à l'échelle locale. Cette solution présente pourtant un certain nombre d'avantages afin de rendre les territoires plus résilients face aux impacts des pressions climatiques et anthropiques (Dillon et Arshad, 2016). Tout d'abord, son principal avantage est d'optimiser le stockage de l'eau sur le territoire au détriment de son ruissellement — permettant ainsi d'augmenter la disponibilité de l'eau et limiter la pression exercée par les prélèvements, surtout en période de sécheresse.

L'idée est que les nappes retiennent l'eau sur le territoire pour ensuite bénéficier aux écosystèmes associés (cours d'eau, zones humides...) et aux divers usages anthropiques pour lesquels elles sont sollicitées dans les périodes de tension hydrique.

Ainsi, de la même manière que les stockages artificiels en surface (barrages, retenues collinaires, réserves de substitution), cette solution vise à rééquilibrer le décalage temporel entre disponibilité de l'eau (en période hivernale) et besoin en eau (en période estivale). Cependant, à la grande différence des stockages artificiels de surface, cette approche s'avère bien plus bénéfique, tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif. Tout d'abord, elle permet généralement le stockage de quantités d'eau plus importantes que ce que peuvent apporter les réservoirs en surface (bien que cet aspect varie fortement suivant la capacité des aquifères). De plus, le milieu souterrain permet de protéger l'eau contre les pertes par évaporation existantes en surface. Ensuite, il permet de filtrer l'eau, améliorant ainsi sa qualité, tout en empêchant la prolifération d'algues et les retombées atmosphériques de polluants que subissent les réservoirs de surface. Enfin, cette approche s'est également montrée plus économique en comparaison d'autres alternatives techniques destinées à accroître le volume d'eau exploitable (Zheng *et al.*, 2021).

Il convient néanmoins de souligner certaines limites pouvant restreindre son déploiement. Tout d'abord, ses inconvénients sont d'ordre technique (Imig *et al.*, 2022 ; Casanova *et al.*, 2016). En effet, cette approche nécessite une bonne connaissance du sous-sol et de la nature des aquifères sous-jacents — la roche-réservoir devant être capable de stocker l'eau en quantité et suffisamment longtemps (autrement, l'effet de stockage sera limité) et dans des conditions assurant une qualité acceptable (interactions hydrobiogéochimiques entre l'eau et la roche). De plus, le sol (à l'interface entre la surface et la nappe) doit être en mesure de laisser l'eau s'infiltrer dans de bonnes conditions. Le déploiement de cette solution est donc tributaire de l'identification de sites satisfaisants sur le plan de la porosité (capacité de stockage) et de la transmissivité (vitesse d'écoulement de l'eau dans le milieu souterrain). À côté de la faisabilité technique, un problème rencontré de façon récurrente concerne la baisse de transmissivité et de porosité causée par un phénomène de colmatage des sols (*clogging* en anglais). Ce phénomène — pouvant être d'origine physique, mécanique, chimique ou biologique — est principalement lié à la qualité des eaux utilisées pour la recharge artificielle (quantité de sédiment, de bactéries...) (Hartog et Stuyfzand, 2017). Enfin, de nombreuses questions se posent sur l'impact potentiel que peut avoir la recharge artificielle sur la qualité des eaux souterraines et sur le risque de contamination qui en découle. Aussi, cette approche doit être utilisée avec beaucoup de précautions.

Actuellement, une cinquantaine de sites visant à permettre la recharge artificielle des nappes ont été recensés en France par le BRGM<sup>180</sup>. Ils concernent essentiellement des projets visant une utilisation rapide de l'eau infiltrée — à destination de captages

180. <https://www.brgm.fr/fr/actualite/dossier-presse/gestion-durable-eaux-souterraines-recharge-naturelle-recharge-maitrisee> (consulté le 18/08/2025).

pour l'eau potable notamment (filtrats en berge de rivière ou de fleuve principalement). À titre d'exemple, dans les Yvelines, l'eau de la Seine est ainsi captée, puis traitée, pour ensuite recharger artificiellement les nappes à l'aide de bassins d'infiltration<sup>181</sup>. Pour ce qui est des dispositifs visant à un stockage de l'eau à moyen terme — destiné à une reprise différée dans le temps —, ils sont encore en phase d'expérimentation, en France tout du moins. Le département de Haute-Garonne, notamment, a ainsi lancé une expérimentation visant à recharger artificiellement la nappe alluviale d'accompagnement de la Garonne (projet R'Garonne<sup>182</sup>). En utilisant une centaine de kilomètres de rigoles et de fossés, l'objectif est de stocker dans les aquifères une partie de l'eau de la Garonne (de 5 à 10 millions de mètres cubes par an), afin d'apporter un soutien d'étiage naturel supplémentaire en période sèche. Un projet similaire est également en cours d'expérimentation dans le Lot-et-Garonne (Projet Ramage)<sup>183,184</sup>.

Au final, la recharge artificielle des nappes, comme toutes les autres solutions, ne constitue pas une solution unique, mais fait partie d'un panel de solutions innovantes pour la gestion intégrée de la ressource (Dillon *et al.*, 2020). Cette solution semble présenter de meilleurs bénéfices pour optimiser la disponibilité de l'eau sur le territoire, comparée à d'autres solutions techniques, en particulier les stockages artificiels en surface. Elle peut donc être envisagée partout où cela est possible, à condition de bien prendre en considération ses exigences au point de vue qualité d'eau, afin de réduire autant que possible ses impacts.

## Désalinisation d'eau de mer

La désalinisation (ou le dessalement) d'eau de mer est un processus visant à éliminer le sel et les autres minéraux de l'eau de mer (ou de l'eau saumâtre) pour produire de l'eau douce, utilisable pour la consommation humaine ou, plus rarement, l'irrigation et les usages industriels (El-Dessouky et Ettouney, 2002). S'appuyant sur des infrastructures lourdes, la désalinisation est devenue une véritable industrie à l'échelle mondiale. Elle peut plus rarement intégrer d'autres types d'eau nécessitant d'être « purifiés » (eaux de surface ou souterraines) (Saleh *et al.*, 2019).

Son principe repose sur différentes techniques pouvant être séparées en deux grandes catégories : les approches par évaporation et condensation ; et les approches par filtration (Curto *et al.*, 2021). Tout d'abord, les approches par évaporation et condensation ont été historiquement les premières développées, permettant le déploiement

181. [https://www.francetvinfo.fr/meteo/canicule/secheresse-l'alimentation-artificielle-des-nappes-phreatiques-comme-solution\\_5153020.html](https://www.francetvinfo.fr/meteo/canicule/secheresse-l'alimentation-artificielle-des-nappes-phreatiques-comme-solution_5153020.html) (consulté le 18/08/2025).

182. <https://www.haute-garonne.fr/dossier/rgaronne-recharge-nappe-garonne-eau> (consulté le 18/08/2025).

183. <https://www.ladepeche.fr/2023/05/19/lot-et-garonne-un-test-dinfiltration-revolutionnaire-pour-stocker-de-leau-11206305.php> (consulté le 18/08/2025).

184. <https://www.sudouest.fr/environnement/lot-et-garonne-comment-l-eau-du-canal-peut-remplir-les-nappes-phreatiques-15208033.php> (consulté le 18/08/2025).

de la désalinisation moderne. Sans entrer dans le détail de tous les procédés utilisés, l'idée de base est d'évaporer de l'eau de mer (à l'aide de procédés thermiques principalement ou, plus rarement, de procédés mécaniques) — la vapeur d'eau étant purifiée des éléments qui étaient initialement présents dans l'eau d'origine — pour ensuite la condenser à nouveau en eau liquide. Plus récemment, les approches par filtration se sont largement développées, leur utilisation dépassant maintenant les approches par évaporation et condensation à l'échelle mondiale (Kucera, 2019). L'idée de base cette fois-ci est de filtrer l'eau de mer, par exemple en la faisant passer au travers d'une membrane semi-perméable (sous l'effet de la pression, d'un gradient électrique ou d'un gradient de température), dans le but d'extraire au passage les particules dissoutes. À titre d'exemple, une des approches les plus utilisées appartenant à cette catégorie est l'osmose inverse (Malaeb et Ayoub, 2011).

Relativement développée dans de nombreux pays ou régions arides et semi-arides à l'échelle mondiale (Israël, pays du Golfe, Californie, Canaries...), la désalinisation est en revanche encore anecdotique en France. Elle est notamment déployée depuis une cinquantaine d'années sur l'île de Sein, en Bretagne<sup>185</sup>. En 2022, l'île morbihanaise de Groix avait également mis en place une unité temporaire de désalinisation, afin de faire face à la sécheresse combinée à une forte hausse de la consommation d'eau durant la saison touristique<sup>186</sup>. À l'échelle européenne, Barcelone dispose de la plus grosse usine de désalinisation, capable d'alimenter environ 20 % de la population de la métropole en eau potable<sup>187</sup>. En 2024, face à la sécheresse sévissant en Catalogne, le choix a même été fait de renforcer cette usine d'une unité flottante<sup>188</sup>.

Un des avantages les plus notables de la désalinisation d'eau de mer est de pouvoir s'émanciper des limites imposées par le cycle hydrologique — l'idée étant que, tant que de l'eau de mer est disponible, théoriquement (sous condition d'accès à une énergie suffisante), il est possible de produire de l'eau douce sans être tributaire des conditions météorologiques (Martínez-Alvarez *et al.*, 2017). Cette solution permet ainsi de créer une ressource en eau totalement nouvelle qui soit fiable (c'est-à-dire réduisant les risques de rupture d'approvisionnement), offrant un approvisionnement en eau durable (dans le temps) pour les régions souffrant de pénuries d'eau douce. Suivant la procédure mise en œuvre, la désalinisation a également le potentiel de fournir une eau de grande qualité en comparaison d'autres ressources en eau — permettant de se débarrasser de nombreux éléments polluants.

185. <https://www.letelegramme.fr/en-quete-de-demain/sur-lile-de-sein-leau-de-mer-coule-de-source-6477678.php> (consulté le 18/08/2025).

186. <https://france3-regions.francetvinfo.fr/bretagne/morbihan/lorient/secheresse-une-usine-de-dessalement-d-eau-de-mer-installee-a-groix-pour-faire-face-au-manque-d-eau-douce-sur-l-ile-2592400.html> (consulté le 18/08/2025).

187. <https://france3-regions.francetvinfo.fr/occitanie/pyrenees-orientales/perpignan/ici-on-separe-le-sel-de-l-eau-la-catalogne-parie-sur-le-dessalement-de-l-eau-de-mer-pour-lutter-contre-la-secheresse-2767166.html> (consulté le 18/08/2025).

188. [https://www.francetvinfo.fr/monde/espagne/secheresse-en-catalogne-barcelone-va-installer-une-usine-flottante-de-dessalement-d-eau-de-mer\\_6494750.html](https://www.francetvinfo.fr/monde/espagne/secheresse-en-catalogne-barcelone-va-installer-une-usine-flottante-de-dessalement-d-eau-de-mer_6494750.html) (consulté le 18/08/2025).

Néanmoins, cette approche est loin d'être une solution miracle et présente aussi de nombreux inconvénients (Zolghadr-Asli *et al.*, 2023). Tout d'abord, d'un point de vue économique, il s'agit d'une solution relativement coûteuse — du fait du coût d'installation et de maintenance des infrastructures, mais surtout du fait des besoins énergétiques qu'elle requiert. L'énergie étant elle-même dépendante des prix du marché, cela rend en outre les coûts de la désalinisation extrêmement volatiles. De plus, suivant la procédure mise en œuvre (qualité de l'eau d'origine, processus de traitement et de distribution de l'eau), la désalinisation peut poser des problèmes en matière de qualité de l'eau et de santé. De nombreux contaminants (bactériens, chimiques, viraux...) peuvent être introduits à différents moments du processus, rendant indispensable de bien traiter l'eau à toutes les étapes. Parallèlement, le processus de désalinisation peut retirer de l'eau de nombreux minéraux (tels que le magnésium et le calcium), ce qui, à long terme, peut s'avérer problématique pour une consommation humaine (Cooley *et al.*, 2006). Afin de pallier le problème, il est ainsi recommandé de procéder à un traitement post-désalinisation, afin de reminéraliser l'eau.

Les usines de désalinisation ne sont également pas sans conséquences environnementales (Lee et Jepson, 2021 ; Elsaid *al.*, 2020), bien que ces effets soient très variables d'un cas à l'autre (Eyl-Mazzega et Cassagnol, 2022). Tout d'abord, utilisant actuellement principalement des énergies fossiles, les importants besoins en énergie de cette industrie en font un très gros émetteur de gaz à effet de serre (Shahzad *et al.*, 2017). En d'autres termes, envisager cette approche afin de permettre aux territoires de s'adapter aux impacts du changement climatique aurait pour autre conséquence de contribuer à amplifier le phénomène (forme de maladaptation). Heureusement, les technologies évoluent et permettent à la désalinisation de gagner en efficacité énergétique au fil du temps (Joo et Tansel, 2015). Le passage des combustibles fossiles conventionnels aux ressources renouvelables constitue une autre stratégie novatrice pour rendre ces technologies plus rentables et plus respectueuses de l'environnement (Kalogirou, 2005 ; Shatat et Riffat, 2014). Cependant, si elles permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre, les énergies renouvelables ne sont pas non plus dénuées d'impacts environnementaux (changements de couverture des sols, pollutions, fragmentation des habitats...). De plus, la désalinisation entrerait en compétition avec d'autres usages énergétiques. Dans un monde aux ressources limitées, une priorisation des enjeux est donc indispensable.

Ensuite, outre les impacts liés aux changements de couverture des sols nécessaires à la construction des infrastructures de désalinisation, ses principaux impacts environnementaux sont liés aux prélèvements et au rejet d'eau dans le milieu naturel (milieu marin en particulier). Les retours d'expérience à travers le monde montrent ainsi que, du fait des importantes quantités d'eau nécessaires à son fonctionnement, la désalinisation peut entraîner la mort de nombreux organismes (planctons, poissons, oiseaux et mammifères marins...) au niveau du point de prélèvement (bien que cet impact soit très spécifique au type d'espèce et au site de désalinisation). Mais surtout, un des

principaux impacts de ce type d'infrastructure concerne le rejet important de saumures (Jones *et al.*, 2019). En effet, après le processus de désalinisation, l'eau est séparée en deux parties : l'eau dessalée et les résidus concentrés. Or ces résidus, contenant une teneur en sel très élevée, ainsi que de nombreux produits chimiques utilisés dans le prétraitement et l'entretien des installations, sont majoritairement rejetés en mer. Bien que l'impact de ces rejets soit là encore très variable en fonction des installations, en excès (en particulier dans le cas d'une forte concentration d'usines sur un même littoral), ils ont néanmoins le potentiel de fortement dégrader le fonctionnement des écosystèmes marins (Roberts *et al.*, 2010).

Au final, il n'en demeure pas moins que les efforts en cours afin d'améliorer l'efficacité énergétique et minimiser l'impact environnemental de la désalinisation offrent des perspectives intéressantes (Zolghadr-Asli *et al.*, 2023). Cependant, si cette solution peut permettre à certains territoires littoraux de compléter l'approvisionnement en eau potable pour leur population, cela ne règlera pas la question pour les territoires en zone continentale. Également, il est nécessaire d'aborder la question fondamentale des usages de l'eau auxquels la désalinisation vise à répondre. Au vu du coût de production (malgré les évolutions technologiques), cette solution s'avère intéressante pour l'eau potable principalement. En revanche, elle ne permettra vraisemblablement pas de répondre au besoin d'irrigation agricole de grandes cultures gourmandes en eau comme le maïs. Sachant que cette irrigation agricole concerne la majorité des consommations d'eau à l'échelle nationale, les bénéfices de la désalinisation ne peuvent donc être que très marginaux : il est nécessaire de mobiliser l'ensemble des autres solutions.

Aussi, le déploiement de cette solution doit être envisagé au cas par cas. Si certains pays du monde ne peuvent pas vraiment faire autrement (tout comme cela peut être compliqué pour certaines îles), en France, au vu de ses inconvénients d'un point de vue énergétique, économique et environnemental, la désalinisation d'eau de mer devrait être une des dernières solutions à envisager. Il semble ainsi judicieux de la considérer au sein du panel de solutions à disposition permettant aux territoires de faire face aux conséquences du changement climatique. Il est également nécessaire, au même titre que d'autres solutions techniques, de veiller à ce que la désalinisation ne contribue pas à retarder une restructuration sociale et économique plus profonde. Ces conclusions sont d'ailleurs rapportées par un certain nombre de travaux scientifiques, comme le soulève notamment une étude portant sur l'île suédoise de Gotland : « Plutôt que de plaider contre le dessalement en soi, nous soulignons le risque de dépolitisation de l'approvisionnement en eau par la prise de décisions technocratiques, la normalisation de la rareté, la normalisation de certaines technologies et l'urgence liée à l'accroissement de l'approvisionnement en eau "à tout prix économique" excluant la remise en cause du développement utilisant beaucoup de ressources » (Speckhahn et Isgren, 2019).

# Partie 3

## Partager les connaissances avec « Trajectoire eau et territoire »

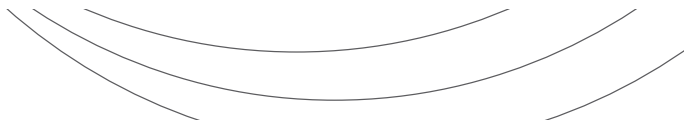
Au-delà de cet ouvrage, les connaissances qui y sont abordées peuvent être partagées à l'aide de l'outil de médiation « Trajectoire eau et territoire »<sup>189</sup> — développé dans le but de rassembler les usagers d'un territoire (élus, services de collectivités, entreprises, associations, citoyens...) et favoriser une mise en débat du sujet de l'eau (c'est-à-dire de permettre un croisement des points de vue et savoirs). Composé de cartes et de petits cubes à organiser autour d'un plateau représentant un territoire et son bassin versant, cet outil vise, lors d'ateliers d'une durée de deux à trois heures, à mettre à disposition des participants un ensemble d'éléments (issus de cet ouvrage ainsi que de données locales) permettant de mieux comprendre les enjeux de l'eau sur leur territoire (fonctionnement de l'hydrosystème local, impacts des pressions anthropiques et climatiques sur la disponibilité en eau...).

Dans le même esprit que cet ouvrage, cet outil vise à offrir une vision à la fois transverse (croisant des enjeux d'eau, de biodiversité, d'aménagement, d'attractivité, d'agriculture...) et territorialisée — c'est-à-dire qu'il vise à permettre un ancrage local, prenant en compte les spécificités et enjeux propres à chaque territoire (climat, géologie, usages de l'eau, usages des sols...). À partir de cette compréhension partagée des enjeux locaux, l'objectif est ensuite de faire émerger (et de hiérarchiser) collectivement des solutions qui soient adaptées à chaque contexte et permettent de rendre le territoire plus résilient — c'est-à-dire plus robuste face aux changements. L'enjeu est ainsi d'identifier la plupart des éléments impactant le territoire : ceux sur lesquels il y a peu de contrôle à l'échelle locale (les pressions climatiques, par exemple) et ceux sur lesquels les acteurs locaux disposent de marges de manœuvre (adaptabilité).

Développé à partir de 2021, Trajectoire eau et territoire a été initialement testé en Bretagne (Lorient Agglomération et bassins versants du Scorff et du Blavet) auprès d'un public varié (étudiants, chercheurs, services de collectivités, élus, associations,

---

<sup>189</sup>. <https://eau-et-territoire.org/trajectoire> (consulté le 18/08/2025).





citoyens...). À partir de 2023, en collaboration avec l'association Water Family<sup>190</sup>, cet outil a ensuite été transposé sur de nombreux territoires à l'échelle nationale. Ce travail a ainsi permis de renforcer l'expérience à la fois dans la conduite d'ateliers — donnant lieu à plusieurs évolutions dans l'animation de l'outil — mais surtout, dans son adaptation au contexte de nouveaux territoires en collaboration avec les gestionnaires locaux. Dans ce contexte, cette troisième partie vise, dans un premier temps, à donner un aperçu de la manière dont cet outil intègre les connaissances abordées au sein de cet ouvrage et comment elles sont ensuite adaptées aux différentes spécificités locales. Il ne s'agit en revanche pas de son mode d'emploi — un ouvrage complémentaire étant plus spécifiquement consacré à cela. Dans un second temps, cette partie propose une synthèse des retours d'expériences de l'utilisation de cet outil dans les territoires.

À noter que les connaissances mobilisées au sein de cet ouvrage peuvent également être partagées à l'aide d'un second outil associé à Trajectoire eau et territoire : le « Kit de sensibilisation des élus aux enjeux de l'eau »<sup>191</sup> proposé par le collectif Aquagir<sup>192</sup>, le programme eau de la Banque des Territoires. Outre la mobilisation des offres de la Banque des territoires (prêts, ingénierie, consignation et investissements), le but de ce programme est d'accompagner le passage à l'action des collectivités territoriales autour des questions de gestion locale de l'eau — notamment à l'aide d'outils pédagogiques à destination des décideurs locaux et de leurs agents, afin de mieux décrypter et agir sur l'eau au sein de leur territoire. Le « Kit de sensibilisation des élus aux enjeux de l'eau » reprend ainsi en grande partie les éléments (cartes, descriptifs, cubes) et la jouabilité de Trajectoire eau et territoire — et donc se base sur les mêmes connaissances issues de cet ouvrage. La complémentarité offerte par ce kit est d'être facilement déployable : offrant une compréhension plus générale des enjeux à l'aide de données à l'échelle nationale, il ne nécessite pas d'être adapté aux spécificités de chaque territoire. Ce kit a donc vocation à être diffusé assez largement, Trajectoire eau et territoire ciblant ensuite les territoires souhaitant un atelier plus « sur mesure ».

190. <https://waterfamily.org> (consulté le 18/08/2025).

191. <https://aquagir.fr/tout-savoir-sur-leau/kit-sensibilisation-elus-enjeux-eau> (consulté le 18/08/2025).

192. <https://aquagir.fr> (consulté le 18/08/2025).

## 8. L'intégration des connaissances locales au sein de l'outil

L'objectif de Trajectoire eau et territoire est de permettre de s'adapter autant que possible aux spécificités de chaque territoire (climat, géologie, usages de l'eau, activités agricoles...) (fig. 8.1). Ce chapitre s'attachera ainsi à donner quelques exemples d'intégration des connaissances mobilisées dans cet ouvrage et leur territorialisation au sein des composants de l'outil.

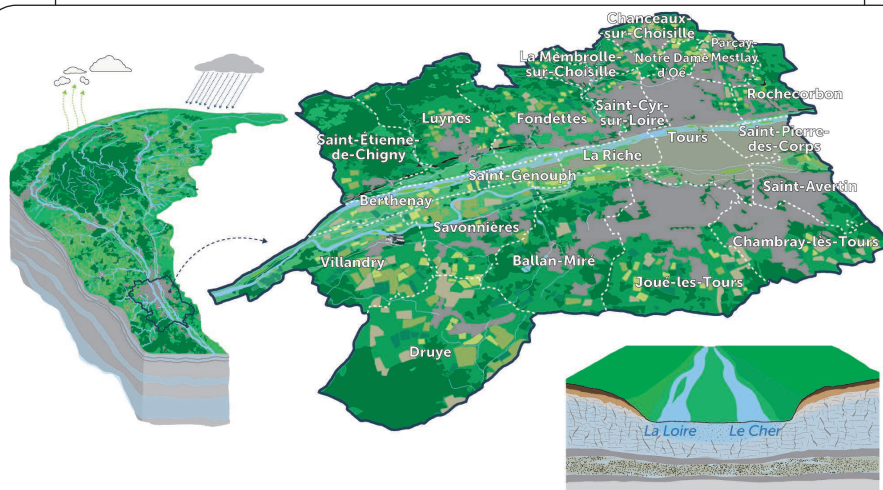
**Figure 8.1.** Les différents éléments composant l'outil Trajectoire eau et territoire.



## Le plateau

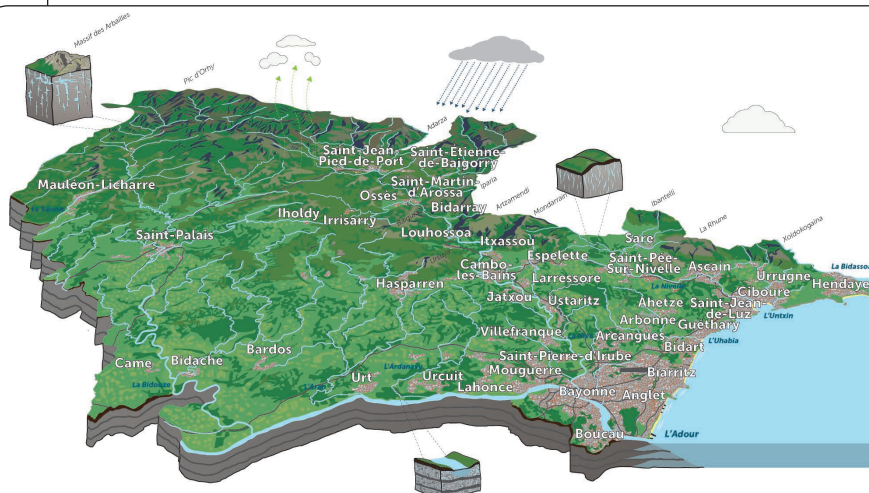
Lors des ateliers, une première étape pour les participants est de bien identifier leur territoire (les limites des différentes communes, les principales catégories d'occupation des sols...). Comme abordé dans cet ouvrage, une autre nécessité est d'également réussir à remettre en cohérence les échelles administratives (bassin de vie, intercommunalité...) avec les échelles hydrologiques alimentant chaque territoire (les bassins versants). En d'autres termes, l'objectif est de permettre aux participants de mieux comprendre d'où provient l'eau alimentant leur territoire (c'est-à-dire de quels territoires ils sont tributaires à l'amont) et où elle s'écoule ensuite (c'est-à-dire quels sont les territoires impactés en aval). Également, on ne peut comprendre le cycle de l'eau sur son territoire sans comprendre le lien avec les eaux souterraines. De ce fait, il est aussi important de représenter du mieux possible les spécificités hydrogéologiques propres à chaque territoire. L'intégration de ces enjeux au sein de l'outil Trajectoire eau et territoire peut ainsi en partie se faire à l'aide du plateau, comme illustré ici à travers deux exemples d'adaptations : Tours Métropole Val de Loire (TMVL) (fig. 8.2), et la Communauté d'agglomération du Pays basque (CAPB) (fig. 8.3).

**Figure 8.2.** Représentation du territoire de Tours métropole Val de Loire, à la confluence des bassins versants de la Loire et du Cher. Elle intègre les spécificités hydrogéologiques locales composées d'une succession de couches perméables et imperméables (bassin sédimentaire) : aquifères poreux formés par les alluvions de la vallée de la Loire et du Cher (en surface) et les sables du Cénomanien (en profondeur), et aquifères fissurés formés par la couche de craie du Séno-turonien (située à proximité de la surface).



Source : © Water Family.

**Figure 8.3.** Représentation du territoire de la communauté d'agglomération du Pays basque et des bassins versants l'alimentant (affluents de l'Adour et bassins côtiers basques). Elle intègre les spécificités hydrogéologiques locales : aquifères poreux formés par les alluvions des vallées et par les couches sédimentaires du Bassin aquitain, aquifères fissurés dans une majorité des zones montagneuses, et aquifères karstiques au niveau de certains massifs.



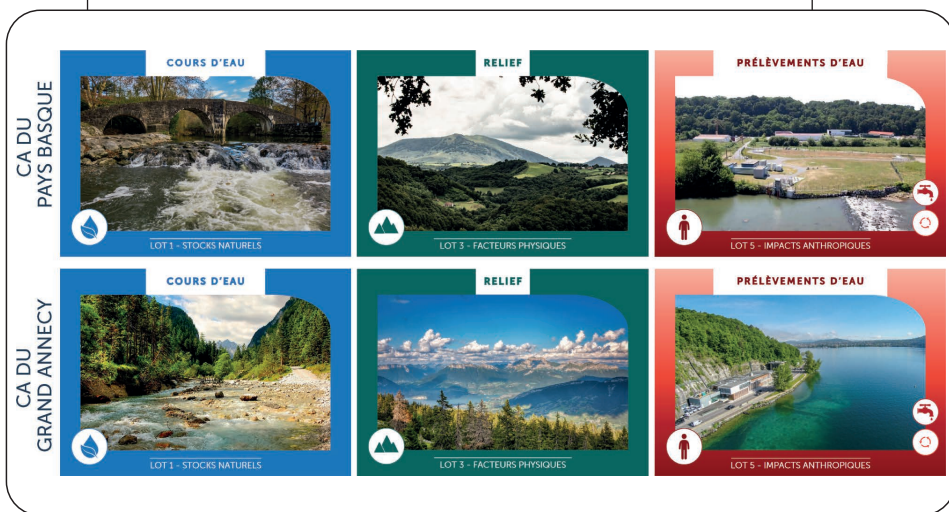
Source : © Water Family.

## Les cartes

Les différentes sections abordées dans cet ouvrage sont ensuite intégrées au sein de l'outil sous la forme de lots de cartes : lot 1 « Stocks naturels », lot 2 « Flux », lot 3 « Facteurs physiques », lot 4 « Facteurs biologiques », lot 5 « Impacts anthropiques », lot 6 « Conséquences physiques » et lot 7 « Conséquences sociales ». L'objectif est de rendre visible l'ensemble des thématiques issues de cet ouvrage, en les abordant progressivement, afin de faciliter la compréhension des processus. En complément, l'ensemble des leviers d'action locaux abordés (solutions sociales et politiques, solutions fondées sur la nature et solutions techniques) est également proposé sous forme de cartes durant les ateliers. Cependant, l'objectif est que les solutions proposées émanent prioritairement des participants eux-mêmes, à partir de leurs connaissances du territoire et de leur compréhension des enjeux. Ces cartes « solutions » servent ainsi principalement à venir enrichir les propositions des participants, avec des idées qui n'auraient pas été envisagées. En fin de compte, l'adaptation de l'outil aux spécificités du territoire concernera ainsi principalement les lots de cartes 1 à 7, pouvant être réalisée à plusieurs niveaux.

Tout d'abord, le nombre de cartes pourra varier d'un territoire à l'autre. À titre d'exemple, dans le cas du territoire de TMVL, à la fois les cartes liées à l'aspect littoral (océan, salinisation des eaux souterraines littorales, dessalement d'eau de mer...) et au contexte montagneux (manteau neigeux, fonte des neiges...) ne sont pas mobilisées. Les usages de l'eau ne seront également pas les mêmes en fonction des territoires. Certains seront par exemple uniquement concernés par la production d'eau potable et l'agriculture, tandis que d'autres pourront également intégrer la production d'énergie. De même, l'ensemble des autres pressions anthropiques n'est pas toujours présent sur tous les territoires. Enfin, tous les territoires ne sont pas identiquement concernés par les mêmes conséquences physiques : à titre d'exemple, la problématique du retrait-gonflement des argiles ne touche pas l'ensemble des territoires.

**Figure 8.4.** Exemples d'illustrations de cartes sur deux adaptations : la Communauté d'agglomération du Pays basque et la Communauté d'agglomération du Grand Annecy.



Ensuite, cette territorialisation de l'outil vise à faire évoluer les illustrations au sein des cartes (à l'aide d'images locales), de manière à ce que les participants se projettent le plus possible au sein de leur territoire (fig. 8.4). Dans le cas d'une adaptation au territoire de TMVL, cette adaptation permettait également d'intégrer sur certaines cartes le logo de l'intercommunalité, afin de faciliter l'identification (pour les participants) des éléments sur lesquels la collectivité dispose de compétences (par exemple le traitement des eaux usées, la production d'eau potable, l'urbanisme...). Pour finir, cette adaptation passe également par l'intégration d'informations locales au sein du descriptif des cartes (fig. 8.5).



**Figure 8.5.** Exemples d'intégration de données locales sur deux cartes issues d'une adaptation pour le territoire de Tours métropole Val de Loire.



## Les cubes

Un objectif de Trajectoire eau et territoire est de pouvoir représenter de manière sensible les flux entre les différents stocks naturels, permettant de visualiser comment l'eau issue des précipitations transite ensuite sur le bassin versant. Pour cela, et quel que soit le territoire, les apports annuels des précipitations sont représentés sous la forme de 100 cubes bleus (voir fig. 8.1). Par exemple, ces 100 cubes représenteraient 700 mm de précipitations annuelles moyennes dans le cas du territoire de TMVL,

contre 1 500 mm dans le cas du territoire de la CAPB. L'intérêt est que ces 100 cubes permettent dans un second temps de simplifier les flux sous forme de pourcentage, traduisant les proportions annuelles moyennes de précipitations suivant les trois chemins abordés au sein de cet ouvrage (fig. 1.7). Par exemple, dans le cas du territoire de TMVL, elles sont captées à 72 % par l'évapotranspiration, à 20 % par l'infiltration et à 8 % par le ruissellement (contre 47, 40 et 13 % respectivement, dans le cas du territoire de la CAPB).

Un autre intérêt de ces cubes est qu'ils permettent de rendre visible la variabilité saisonnière de ces différents flux. Par exemple, dans le cas de TMVL, 55 % des précipitations se produisent durant la période hivernale et 45 % durant la période estivale (contre 60 et 40 % respectivement, dans le cas de la CAPB). De même, 67 % de l'infiltration (et donc de la recharge des nappes) se produisent durant la période hivernale sur le territoire de TMVL (contre 75 % sur le territoire de la CAPB). Ces cubes peuvent en outre servir à représenter le stockage transitoire des précipitations sous forme de manteau neigeux.

Ensuite, ces cubes permettent de représenter visuellement les impacts des activités humaines sur le cycle de l'eau. L'outil Trajectoire eau et territoire n'a pas vocation à quantifier de manière exacte ces différents impacts sur le territoire (cette opération nécessitant un travail important de modélisation qui complexifierait le déploiement de l'outil). En revanche, l'objectif est que les participants comprennent quels sont les effets connus (de manière générale) de ces aménagements sur le cycle de l'eau : par exemple, l'urbanisation réduit l'infiltration et augmente le ruissellement, se traduisant par des transferts de cubes d'un flux à l'autre. L'intérêt est également de cumuler les différents impacts entre eux (et leurs conséquences sur les cubes), illustrant qu'une majorité des activités humaines a généralement eu pour conséquence d'accélérer le temps de transfert de l'eau sur le bassin versant (réduisant l'infiltration au profit du ruissellement).

Pour finir, ces cubes permettent aussi de représenter les impacts attendus du changement climatique. Tout d'abord — dans les territoires où cet effet est attendu —, il pourra être mis en avant une diminution des précipitations annuelles : c'est-à-dire qu'il serait possible de retirer une partie des cubes. De plus, si on se replace à l'échelle saisonnière, même en l'absence de baisse annuelle de précipitations, il est attendu une accentuation de la saisonnalité : moins d'eau en été et plus en hiver. Ainsi, partant d'une répartition de 60 % des précipitations sur la période hivernale (et 40 % sur la période estivale), il pourrait être mise en avant une nouvelle répartition de l'ordre de 70 % durant l'hiver et 30 % durant l'été. Ensuite, même sans changement de régime de précipitations, l'augmentation attendue des températures réduira nécessairement la part de pluie efficace : plus d'évapotranspiration au détriment de l'infiltration et du ruissellement. Enfin, la proportion de précipitations qui se produisait sous forme de neige va également se réduire, pouvant ainsi être illustrée en manipulant la répartition des cubes sur le plateau.

## 9. Retours d'expérience des ateliers

### « Trajectoire eau et territoire »

De 2022 à 2025, plus d'un millier de personnes ont participé à des ateliers Trajectoire eau et territoire au sein de près de 25 territoires différents. L'objectif de cet outil est de permettre un croisement des points de vue, aussi la plus grande diversité de participants est généralement souhaitée (élus, gestionnaires, habitants, agriculteurs, entreprises...). Pour autant, le cadre d'action de cet outil et les personnes mobilisées peuvent varier en fonction de chaque atelier. Il peut s'agir par exemple d'ateliers ayant uniquement vocation à permettre la sensibilisation du grand public ou bien de salariés d'une entreprise. Il ne s'agit, en revanche, pas de l'objectif initial de cet outil de concertation et de sensibilisation, qui a plutôt vocation à être associé à des actions plus opérationnelles — par exemple en l'intégrant à des démarches d'élaboration ou de révision de divers documents locaux de planification (Scot, PLUi, Sage...).

Ainsi, en avril 2023, une adaptation de l'outil au contexte du territoire de la communauté de communes du Nord-Est Béarn<sup>193</sup> (Pyrénées-Atlantiques) avait permis de rassembler une quarantaine d'élus locaux dans le cadre de l'élaboration de leur PLUi. L'idée était ainsi de favoriser une réflexion transversale sur les enjeux croisés de gestion de l'eau et d'urbanisme, dans un contexte de changement climatique. De la même manière, en janvier 2024, une adaptation de l'outil au contexte du Pays Sud toulousain<sup>194</sup> (Haute-Garonne) avait permis de rassembler une quarantaine d'acteurs locaux dans le cadre de la révision de leur Scot. Ce dernier avait permis une plus grande diversification des points de vue que dans l'exemple précédent, rassemblant (à parts relativement égales) des élus locaux, des techniciens des différentes intercommunalités du territoire, ainsi que des habitants (issus du Conseil de développement<sup>195</sup>).

En 2025, une adaptation est également déployée sur le territoire de la CAPB (Pyrénées-Atlantiques) dans le cadre de la révision du Sage Côtiers Basques, ainsi que dans le cadre de l'élaboration du Scot Pays basque et Seignanx<sup>196</sup>. Tout récemment, une adaptation a également été réalisée afin d'accompagner l'émergence d'un nouveau Sage Eaux souterraines de Gascogne<sup>197</sup> et de faciliter le partage de connaissances concernant le fonctionnement des nappes auprès des acteurs de ce territoire. Enfin, une

193. <https://www.cc-nordestbearn.fr> (consulté le 18/08/2025).

194. <https://payssudtoulousain.fr> (consulté le 18/08/2025).

195. <https://payssudtoulousain.fr/conseil-de-developpement> (consulté le 18/08/2025).

196. <https://www.scot-pbs.fr> (consulté le 18/08/2025).

197. <https://www.gesteau.fr/sage/eaux-souterraines-de-gascogne> (consulté le 18/08/2025).



autre adaptation est également en cours au sein du Sage Rance-Frémur (Bretagne) et permettra notamment de favoriser la formation des nouveaux membres de CLE lors de son renouvellement à l'issue des élections municipales de 2026. L'objectif sera en outre de favoriser le partage (auprès de l'ensemble des acteurs locaux) des connaissances issues d'une étude HMUC (hydrologie-milieux-usage-climat) ayant récemment été conduite sur ce territoire<sup>198</sup>.

Enfin, une autre application de l'outil Trajectoire eau et territoire est de favoriser le renforcement d'approches transversales au sein des différentes directions (ou services) des collectivités. À titre d'exemple, en février 2025, l'adaptation de l'outil au contexte du territoire de TMVL avait permis de rassembler une vingtaine de personnes issues de différentes directions de l'intercommunalité : cycle de l'eau, transition écologique, habitat, urbanisme, espaces verts, voirie, développement économique, tourisme... L'objectif était ainsi de permettre à l'ensemble des personnes issues de ces directions de prendre conscience que la gestion de l'eau sur leur territoire était l'affaire de tous. Au final, quels que soient le public et le territoire où l'outil est déployé, une même série de trois questions est systématiquement posée aux participants avant de clôturer les ateliers : qu'est-ce qui a le plus marqué dans l'atelier ? quelles sont les principales vulnérabilités identifiées pour leur territoire ? et quels sont les principaux leviers d'action locaux à retenir ? Dans ce contexte, cette section propose ainsi une synthèse des retours d'expérience autour de ces trois thématiques.

## Ce qui marque

Un résultat relativement intéressant est que, quel que soit le territoire et quelle que soit la personne animant les ateliers, les mêmes éléments marquants sont généralement évoqués par les participants. Tout d'abord, une première chose qui marque concerne la complexité de la thématique de l'eau (tout comme de l'environnement) et le besoin d'adopter une approche beaucoup plus transversale. Ensuite, l'élément le plus marquant revenant généralement concerne la compréhension des aspects quantitatifs locaux. En particulier, la répartition des différents flux est souvent très marquante : la majorité des participants sous-estiment notamment grandement la proportion des précipitations captée par l'évapotranspiration et surestiment le ruissellement. À ce sujet, l'utilisation des cubes pour représenter ces flux s'avère extrêmement parlante. Un autre élément marquant concerne également la prise en compte des usages locaux de l'eau : la majorité des participants ont généralement en tête (à partir de données à l'échelle nationale) que l'agriculture est le principal usager de l'eau, mais ils peuvent être très surpris d'apprendre que ce n'est pas forcément le cas

198. [https://www.gesteau.fr/sites/default/files/gesteau/content\\_files/document/Depliant-HMUC-oct-2024-web\\_o.pdf](https://www.gesteau.fr/sites/default/files/gesteau/content_files/document/Depliant-HMUC-oct-2024-web_o.pdf) (consulté le 18/08/2025).

sur leur territoire (par exemple en Bretagne, au Pays basque, à TMVL, ou encore en Savoie, l'eau potable recouvre la majorité des prélèvements d'eau).

Le format des ateliers — favorisant une mise en débat assez riche sur le sujet de l'eau et du développement du territoire — est un autre élément qui marque. Enfin, le dernier élément marquant généralement les participants concerne la pluralité des leviers d'action dont disposent les territoires pour s'adapter au changement climatique. Notamment, de nombreux participants sont particulièrement surpris de prendre conscience qu'ils disposent d'ores et déjà de nombreux leviers d'adaptation permettant de rendre leur territoire plus résilient. Ces résultats confortent ainsi l'intérêt de déployer des outils de sensibilisation tels que Trajectoire eau et territoire.

## Les principales vulnérabilités identifiées

Contrairement à la thématique précédente, cette question des vulnérabilités est en revanche très variable en fonction des territoires. Ainsi, dans le cas de l'adaptation au Pays Sud toulousain, il ressort que la principale vulnérabilité identifiée provient du secteur agricole (au sein d'un territoire fortement irrigué pour la culture du maïs), tandis que les territoires en Bretagne, au Pays basque ou en Savoie ont plutôt eu tendance à identifier la question de l'attractivité. Enfin, dans le cas de l'adaptation au territoire de TMVL, la principale vulnérabilité identifiée concernait les questions de l'étalement urbain, au sein de ce territoire déjà très fortement urbanisé et situé majoritairement dans des plaines inondables (vallée de la Loire et du Cher). Ce résultat illustre ainsi l'importance d'une approche territorialisée au sein de ce type d'ateliers de sensibilisation — les vulnérabilités n'étant pas les mêmes partout.

## Les principales solutions retenues

Enfin, un dernier résultat relativement intéressant est que les mêmes catégories de leviers d'action sont généralement retenues, quel que soit le territoire où est déployé l'outil. Parmi les leviers les plus plébiscités se retrouvent, tout d'abord, des solutions sociales et politiques visant à favoriser la sensibilisation des acteurs locaux aux enjeux de l'eau, ainsi qu'à réduire le plus possible les prélèvements d'eau (sobriété des usages). Ensuite, la majorité des leviers d'action locaux retenus concernent des solutions fondées sur la nature ayant pour objectif d'améliorer les capacités de stockage de l'eau dans les sols et les nappes à l'échelle du bassin versant. Il semble opportun de mentionner qu'à l'issue de tous ces ateliers aucune solution technique n'a jamais été retenue par les participants, même si elles étaient bien abordées. Il convient néanmoins de nuancer ces résultats dans la mesure où il s'agit juste de hiérarchisations « fictives » ne prenant pas en compte l'ensemble des contraintes (notamment

économiques, politiques...) propres à ces territoires. Dans la réalité, il sera nécessaire de mobiliser bien plus de solutions que ce qui est rapporté ici. Cependant, ce résultat traduit une prise de conscience du rôle important joué par la concertation dans la compréhension des enjeux locaux de l'eau, qui constitue une étape indispensable à l'atteinte de trajectoires plus résilientes. De plus, bien que les territoires soient tous différents (impliquant donc de varier les leviers d'action), ce résultat traduit également une prise de conscience du rôle important joué par les sols et les nappes dans l'adaptation des territoires.

# Conclusion

L'objectif de cet ouvrage était de fournir un ensemble d'éléments permettant de mieux comprendre les enjeux locaux de l'eau, dans le but de favoriser une gestion plus transversale et résiliente des territoires. Il apparaît ainsi que les activités humaines sont à l'origine d'un nombre varié mais interconnecté d'impacts sur l'eau. Si le défi du changement climatique peut sembler prioritaire, il s'agit en réalité d'une pression venant s'ajouter à toutes les autres pressions anthropiques déjà existantes. Le défi est donc vertigineux : il est nécessaire de prendre en compte l'ensemble de ces pressions en même temps, de manière à anticiper leurs possibles interrelations. Néanmoins, de nombreux leviers d'action locaux sont disponibles et peuvent d'ores et déjà être mobilisés dans les territoires pour permettre de relever ce défi. S'il paraît peu probable de réussir à contrebalancer complètement les effets du changement climatique, ces solutions sont en revanche indispensables afin de fournir des leviers d'adaptation permettant plus de résilience à l'avenir. Il n'incombe donc qu'à chaque territoire de les mettre en œuvre et d'identifier les plus adaptées au contexte local. En effet, une solution donnée sur un territoire ne sera pas forcément adaptée à un autre : il n'y a pas de recette miracle. De plus, il est peu probable qu'une solution unique soit suffisante : c'est d'une diversité de solutions que naîtront les possibilités d'adaptation.

Pour finir, il apparaît important de mentionner que cette mise en avant des leviers locaux d'adaptation ne remet nullement en question le besoin d'atténuation des effets du changement climatique — notamment à travers des mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Car au-delà de certains seuils (pouvant être dépassés dans une trajectoire à + 4 °C pour la France), les territoires risquent de se heurter à des limites (d'ordre biologique, hydrologique...) que ni la volonté politique ni la technologie ne pourront compenser. En d'autres termes, la meilleure façon de « Préparer la France à + 4 °C » serait de ne pas atteindre cette trajectoire climatique. Cependant, ce choix ne dépendant pas uniquement de la volonté des territoires (l'atténuation nécessitant une réponse mondiale), il semble important de pouvoir également bien identifier les marges de manœuvre à disposition. Quoi qu'il en soit, la thématique de l'eau étant de plus en plus au centre de l'attention ces dernières années, cet état des lieux des connaissances invite à s'approprier la question et à innover collectivement pour une adaptation locale. En complémentarité avec cet ouvrage, les ateliers « Trajectoire eau et territoire » offrent une autre manière d'aborder ces enjeux à une échelle locale, en permettant une mise en débat du sujet avec l'ensemble des usagers d'un territoire.

# Liste des abréviations

AEP : alimentation en eau potable  
ANR : Agence nationale de la recherche  
ARS : Agence régionale de santé  
BNPE : Banque nationale des prélèvements quantitatifs en eau  
CAPB : Communauté d'agglomération du Pays basque  
CCSPL : commissions consultatives des services publics locaux  
CGAAER : conseil général de l'Alimentation, de l'Agriculture et des Espaces ruraux  
CGEDD : conseil général de l'Environnement et du Développement durable  
CLE : commission locale de l'eau  
CTGQ : contrat territorial de gestion quantitative  
DDTM : Direction départementale des territoires et de la mer  
Dreal : Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement  
Epag : établissements publics d'aménagement et de gestion de l'eau  
EPCI : établissements publics de coopération intercommunale  
EPTB : établissement public territorial de bassin  
Gemapi : Gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations  
HMUC : Hydrologie-Milieus-Usage-Climat  
Lema : Loi sur l'eau et les milieux aquatiques  
Maec : Mesures agroenvironnementales et climatiques  
Maptam : (Loi de) Modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles  
MISEN : Mission interservices de l'eau et de la nature  
MITI : Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires  
OFB : Office français de la biodiversité  
OiEau : Office international de l'eau  
PAC : Politique agricole commune  
PLU : plan local d'urbanisme  
PLUi : plan local d'urbanisme intercommunal  
PTGE : projet de territoire pour la gestion de l'eau

REUT : réutilisation des eaux usées traitées

Sage : schéma d'aménagement et de gestion de l'eau

Sdage : schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux

Scot : schéma de cohérence territoriale

SFN : solutions fondées sur la nature

Sraddet : schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires

TMVL : Tours métropole Val de Loire

IUCN : Union internationale pour la conservation de la nature

ZAN : Zéro artificialisation net

ZRE : zones de répartition des eaux

# Bibliographie

- Abasq L., 2022. Simulation du projet 2021 de réserves de substitution de la Coopérative de l'eau des Deux-Sèvres, rapport final V2, BRGM/RC-71650-FR, 143 p.
- Abbott B.W., Bishop K., Zarnetske J.P., Minaudo C., Chapin F.S., Krause S., Plont S., 2019. Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions. *Nature Geoscience*, 12 (7), 533-540.
- Abel G.J., Brottrager M., Cuaresma J.C., Muttarak R., 2019. Climate, conflict and forced migration. *Global Environmental Change*, 54, 239-249.
- Abhervé R., Roques C., de Dreuzy J.R., Datry T., Brunner P., Longueuevergne L., Aquilina L., 2024. Improving calibration of groundwater flow models using headwater streamflow intermittence. *Hydrological Processes*, 38 (6), e15167.
- Adekalu K.O., Okunade D.A., Osunbitan J.A., 2006. Compaction and mulching effects on soil loss and runoff from two southwestern Nigeria agricultural soils. *Geoderma*, 137 (1-2), 226-230.
- Adekalu K.O., Olorunfemi I.A., Osunbitan J.A., 2007. Grass mulching effect on infiltration, surface runoff and soil loss of three agricultural soils in Nigeria. *Bioresource Technology*, 98 (4), 912-917.
- Adrover M., Farrús E., Moyà G., Vadell J., 2012. Chemical properties and biological activity in soils of Mallorca following twenty years of treated wastewater irrigation. *Journal of Environmental Management*, 95, S188-S192.
- Alcott B., 2005. Jevons' paradox. *Ecological Economics*, 54 (1), 9-21.
- Alexander J.S., Wilson R.C., Green W.R., 2012. A brief history and summary of the effects of river engineering and dams on the Mississippi River system and delta. *US Geological Survey, Circular* 1375.
- Allan J.D., Castillo M.M., 2007. *Stream Ecology: Structure and function of running waters*, 2<sup>e</sup> édition, Dordrecht, Pays-Bas, Springer Science and Business Media, 436 p.
- Allaume F.W.A.H., Rossing W.A.H., Titttonell P., Jorge G., Dogliotti S., 2014. Reduced tillage and cover crops improve water capture and reduce erosion of fine textured soils in raised bed tomato systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 183, 127-137.
- Alp M., Arnaud F., Barthélémy C., Bernez I., Clemens A., Cottet M. *et al.*, 2024. Restaurer la continuité écologique des cours d'eau : que sait-on et comment passer collectivement à l'action ? *VertigO : la revue électronique en sciences de l'environnement*, 24 (2).
- Altieri M.A., 2018. *Agroecology: The science of sustainable agriculture*, CRC press, Boca Raton, États-Unis, 448 p.
- Andermann C., Longueuevergne L., Bonnet S., Crave A., Davy P., Gloaguen R., 2012. Impact of transient groundwater storage on the discharge of Himalayan rivers. *Nature Geoscience*, 5 (2), 127-132.
- Angulo-Jaramillo R., Bagarello V., Iovino M., Lassabatere L., 2016. *Infiltration Measurements for Soil Hydraulic Characterization*, Berlin, Springer, 386 p.
- Anim D.O., Fletcher T.D., Vietz G.J., Pasternack G.B., Burns M.J., 2018. Effect of urbanization on stream hydraulics. *River Research and Applications*, 34 (7), 661-674.
- Arambourou H., Ferrière S., Belaïd G., Bouarfa S., 2025. Quelle quantité d'eau utilisons-nous ? in : Bouarfa S., Montginoul M., Pelte T., Sauquet É. (coord.), *Comment partager l'eau en France ? À l'ère de l'anthropocène*, Versailles, éditions Quæ, 31-49.
- Arambourou H., Ferrière S., Gaillot A., 2025. L'eau en 2050 : graves tensions sur les écosystèmes et les usages, Haut-commissariat à la Stratégie et au Plan, note d'analyse 156, 16 p.
- Arambourou H., Ferrière S., Oliu-Barton M., 2024. Prélèvements et consommations d'eau : quels enjeux et usages ? France Stratégie, note d'analyse 136, <https://www.strategie.gouv.fr/publications/prelevements-consommations-deau-enjeux-usages> (consulté le 11/09/2025).
- Asano T., 2016. *Artificial Recharge of Groundwater*, Amsterdam, Pays-Bas, Elsevier.
- Asmamaw D.K., 2017. A critical review of the water balance and agronomic effects of conservation tillage under rain-fed agriculture in Ethiopia. *Land Degradation & Development*, 28 (3), 843-855.
- AudéLor, SMSCoT, 2018, Schéma de Cohérence Territoriale du Pays de Lorient – Diagnostic, [https://www.scot-lorient.fr/fileadmin/user\\_upload/SCOT/documents/o1\\_Docs\\_Administratifs/12\\_Actes\\_administratifs/Deliberations/2018/Comite\\_du\\_16\\_mai/SCOT-Lorient-diagnostic-approbation-2018.pdf](https://www.scot-lorient.fr/fileadmin/user_upload/SCOT/documents/o1_Docs_Administratifs/12_Actes_administratifs/Deliberations/2018/Comite_du_16_mai/SCOT-Lorient-diagnostic-approbation-2018.pdf).

- Ayalew T.B., Krajewski W.F., Mantilla R., Wright D.B., Small S.J., 2017. Effect of spatially distributed small dams on flood frequency: Insights from the soap creek watershed. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22 (7), 04017011.
- Ballard C.E., McIntyre N., Wheeler H.S., 2012. Effects of peatland drainage management on peak flows. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16 (7), 2299-2310.
- Barbier R., Lizard S., Fernandez S., 2022. La gouvernance de l'eau à l'épreuve du droit négocié. Enquête sur l'activité réglementaire des commissions locales de l'eau. *Natures Sciences Sociétés*, 30, 1, 46-57.
- Barbier R., Trépos J.Y., 2007. Humains et non-humains : un bilan d'étape de la sociologie des collectifs. *Revue d'anthropologie des connaissances*, 11 (1), 35-58.
- Barone S., 2012. SCOT est-il plus SAGE ? Gestion de l'eau et aménagement du territoire en France depuis la loi du 21 avril 2004. *VertigO : la revue électronique en sciences de l'environnement*, 12 (2).
- Barone S., 2025. Quel horizon normatif pour les politiques de l'eau ? in : Bouarfa S., Montginoul M., Pelte T., Sauquet É. (coord.), *Comment partager l'eau en France ? À l'ère de l'anthropocène*, Versailles, éditions Quæ, 11-29.
- Barone S., Barbier R., Destandau F., Garin P., 2018. *Gouvernance de l'eau : un mouvement de réforme perpétuelle ?* Paris, L'Harmattan, 253 p.
- Barraqué B., 2000. Les demandes en eau en Catalogne : perspective européenne sur le projet d'aqueduc Rhône-Barcelone. *Revue d'économie méditerranéenne*, 48 (191), 357-370.
- Basche A.D., Kaspar T.C., Archontoulis S.V., Jaynes D.B., Sauer T.J., Parkin T.B., Miguez F.E., 2016. Soil water improvements with the long-term use of a winter rye cover crop. *Agricultural Water Management*, 172, 40-50.
- Batalla R.J., Gibbins C.N., Alcázar J., Brasington J., Buendia C., Garcia C. et al., 2021. Hydropeaked rivers need attention. *Environmental Research Letters*, 16 (2), 021001.
- Batalla R.J., Gomez C.M., Kondolf G.M., 2004. Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain). *Journal of Hydrology*, 290 (1-2), 117-136.
- Batavia C., Nelson M.P., 2017. For goodness sake! What is intrinsic value and why should we care? *Biological Conservation*, 209, 366-376.
- Beaumelle L., Tison L., Eisenhauer N., Hines J., Malladi S., Pelosi C. et al., 2023. Pesticide effects on soil fauna communities — a meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 60 (7), 1239-1253.
- Bednarek A.T., 2001. Undamming rivers: a review of the ecological impacts of dam removal. *Environmental Management*, 27, 803-814.
- Beebee T.J., 2022. *Impacts of Human Population on Wildlife: A British Perspective*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Beechie T.J., Sear D.A., Olden J.D., Pess G.R., Buffington J.M., Moir H. et al., 2010. Process-based principles for restoring river ecosystems. *BioScience*, 60 (3), 209-222.
- Béjar M., Vericat D., Batalla R.J., Gibbins C.N., 2018. Variation in flow and suspended sediment transport in a montane river affected by hydropeaking and instream mining. *Geomorphology*, 310, 69-83.
- Benton T., Catton W.R., Grimes P., Hannigan J., McKechnie R., Murphy R. et al., 2002. *Sociological Theory and the Environment: Classical foundations, contemporary insights*, Lanham, États-Unis, Rowman and Littlefield.
- Berghuijs W.R., Woods R.A., Hrachowitz M., 2014. A precipitation shift from snow towards rain leads to a decrease in streamflow. *Nature Climate Change*, 4 (7), 583-586.
- Berndtsson J.C., 2010. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*, 36 (4), 351-360.
- Bertana A., Clark B., Benney T.M., Quackenbush C., 2022. Beyond maladaptation: structural barriers to successful adaptation. *Environmental Sociology*, 8 (4), 448-458.
- Bertolino A.V., Fernandes N.F., Miranda J.P., Souza A.P., Lopes M.R., Palmieri F., 2010. Effects of plough pan development on surface hydrology and on soil physical properties in Southeastern Brazilian plateau. *Journal of Hydrology*, 393 (1-2), 94-104.
- Bertrand N., Blanc P., Debrieu-Levrat C., Cazin P., Kles V., Plante S., 2023. Retour d'expérience sur la gestion de l'eau lors de la sécheresse 2022, rapport d'inspection interministériel, <https://agriculture.gouv.fr/retour-dexperience-sur-la-gestion-de-leau-lors-de-la-secheresse-2022> (consulté le 11/09/2025).
- Beschta R.L., 1998. Forest Hydrology in the Pacific Northwest: additional research needs. *Journal of the American Water Resources Association*, 34 (4), 729-741.
- Bevir M., 2012. *Governance: A very short introduction*, OUP Oxford.



- Bi C., Bi H., Sun G., Chang Y., Gao L., 2014. Scale effects and variability of forest-water yield relationships on the Loess Plateau, China. *The Forestry Chronicle*, 90 (2), 184-191.
- Bigo A., 2020. Les transports face au défi de la transition énergétique. Explorations entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement, thèse de doctorat, Institut polytechnique de Paris, Paris, France.
- Binet E., Escafre A., Fournié F., 2009. Évaluation à mi-parcours de la mise en œuvre du plan d'action gouvernemental pour le Marais poitevin 2003-2012, rapport final, Paris, Conseil général de l'environnement et du développement durable, <https://igedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/notice?id=Affaires-0005251&reqId=21ef-f06a-79do-4ff2-b970-6743cce6d43c&pos=21> (consulté le 11/09/2025).
- Bixio D., Theoye C., De Koning J., Joksimovic D., Savic D., Wintgens T., Melin T., 2006. Wastewater reuse in Europe. *Desalination*, 187 (1-3), 89-101.
- Blakely T.J., Harding J.S., McIntosh A.R., Winterbourn M.J., 2006. Barriers to the recovery of aquatic insect communities in urban streams. *Freshwater Biology*, 51 (9), 1634-1645.
- Blann K.L., Anderson J.L., Sands G.R., Vondracek B., 2009. Effects of agricultural drainage on aquatic ecosystems: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 39 (11), 909-1001.
- Bloomfield J.P., Williams R.J., Goody D.C., Cape J.N., Guha P.M., 2006. Impacts of climate change on the fate and behaviour of pesticides in surface and groundwater — a UK perspective. *Science of the Total Environment*, 369 (1-3), 163-177.
- Blöschl G., Hall J., Viglione A., Perdigão R.A., Parajka J., Merz B., Boháč M., 2019. Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573 (7772), 108-111.
- Blum A., 2005. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential — are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? *Australian Journal of Agricultural Research*, 56 (11), 1159-1168.
- Boiffin J., 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies, thèse de doctorat, Institut national agronomique Paris Grignon.
- Boizard H., Richard G., Roger-Estrade J., Dürr C., Boiffin J., 2002. Cumulative effects of cropping systems on the structure of the tilled layer in northern France. *Soil and Tillage Research*, 64 (1-2), 149-164.
- Bonan G., 2008. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320 (5882), 1444-1449.
- Bosch J.M., Hewlett J.D., 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55 (1-4), 3-23.
- Bot A., Benites J., 2005. The importance of soil organic matter: key to drought-resistant soil and sustained food production. *FAO Soils Bulletin 80*, Rome, Italie, Food & Agriculture Organization of the United Nations.
- Botta G.F., Rivero D., Tourn M., Melcon F.B., Pozzolo O., Nardon G., Stadler S., 2008. Soil compaction produced by tractor with radial and cross-ply tyres in two tillage regimes. *Soil and Tillage Research*, 101 (1-2), 44-51.
- Bouarfa S., Montginoul M., Pelte T., Sauquet E., 2025. *Comment partager l'eau en France ? À l'ère de l'anthropocène*, Versailles, éditions Quæ, 184 p. (coll. Matière à débattre et décider).
- Bouwman A.F., Van Vuuren D.P., Derwent R.G., Posch M., 2002. A global analysis of acidification and eutrophication of terrestrial ecosystems. *Water, Air, and Soil Pollution*, 141, 349-382.
- Bowden J.W., Jarvis R.J., 1985. Soil hardpans and plant growth. *Journal of the Department of Agriculture*, Western Australia, Series 4, 26 (1), 16-17.
- Boyd E., Nykvist B., Borgström S., Stacewicz I.A., 2015. Anticipatory governance for social-ecological resilience. *Ambio*, 44, 149-161.
- Bradshaw C.J., Brook B.W., 2014. Human population reduction is not a quick fix for environmental problems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111 (46), 16610-16615.
- Brandt S.A., 2000. Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena*, 40 (4), 375-401.
- Bricker D., Ibbittson J., 2019. *Empty Planet: The Shock of global population decline*, Londres, Royaume-Uni, Hachette UK, 252 p.
- Brignoli M.L., Espa P., Batalla R.J., 2017. Sediment transport below a small alpine reservoir desilted by controlled flushing: field assessment and one-dimensional numerical simulation. *Journal of Soils and Sediments*, 17, 2187-2201.
- Bronstert A., Vollmer S., Ihringer J., 1995. A review of the impact of land consolidation on runoff production and flooding in Germany. *Physics and Chemistry of the Earth*, 20 (3-4), 321-329.
- Brookes A., 1988. *Channelized Rivers: Perspectives for environmental management*, Chichester, Royaume-Uni, Wiley, 306 p.

- Brown A.E., Zhang L., McMahon T.A., Western A.W., Vertessy R.A., 2005. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, 310 (1-4), 28-61.
- Bruijnzeel L.A., 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104 (1), 185-228.
- Brutsaert W., 2005. *Hydrology: An introduction*, Cambridge, UK Cambridge University Press, 618 p.
- Bullock A., Acreman M., 2003. The role of wetlands in the hydrological cycle. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7 (3), 358-389.
- Cafaro P., Hansson P., Götmark F., 2022. Overpopulation is a major cause of biodiversity loss and smaller human populations are necessary to preserve what is left. *Biological Conservation*, 272, 109646.
- Candela L., Fabregat S., Josa A., Suriol J., Vigués N., Mas J., 2007. Assessment of soil and groundwater impacts by treated urban wastewater reuse. A case study: Application in a golf course (Girona, Spain). *Science of the Total Environment*, 374 (1), 26-35.
- Carlier C., Wirth S.B., Cochard F., Hunkeler D., Brunner P., 2018. Geology controls streamflow dynamics. *Journal of Hydrology*, 566, 756-769.
- Carlier N., Babut M., Belliard J., Bernez I., Burger-Leenhardt D., Dorioz J., Douez O., Dufour D., Grimaldi C., Habets F., Le Bissonnais Y., Molénat J., Rollet A., Rosset V., Sauvage S., Usseglio-Polatera P., Leblanc B., 2016. Cumulative impact of reservoirs on the aquatic environment. Joint scientific assessment summary, technical report.
- Carlier N., Babut M., Belliard J., Bernez I., Leblanc B., Burger-Leenhardt D., Dorioz J.M., Douez O., Dufour S., Grimaldi S., Habets F., Le Bissonnais Y., Molénat J., Rollet A.J., Rosset V., Sauvage S., Usseglio-Polatera P., 2017. *Impact cumulé des retenues d'eau sur le milieu aquatique*, expertise scientifique collective (Irstea), Agence française pour la biodiversité, collection Comprendre pour agir, 200 p.
- Carlier N., Montginoul M., Magand M., Belliard J., Boyer P., Chateau N., Dumas R., Habets F., Leenhardt D., Leblanc B., Tournebise J., Sauvage S., 2025. Quelle place pour les ouvrages de stockage de l'eau dans la trajectoire des territoires ? in : Bouarfa S., Montginoul M., Pelte T., Sauquet É. (coord.), *Comment partager l'eau en France ? À l'ère de l'anthropocène*, Versailles, éditions Quæ, 149-165.
- Carrausse R., 2022. Face à la pénurie d'eau dans le Marais poitevin : dispositifs de gestion et trajectoire conflictuelle de réserves de substitution pour l'irrigation agricole. *L'Année psychologique*, 30 (3), 254-264.
- Caritat J.-A.-N., marquis de Condorcet, *Esquisse d'un tableau historique des progrès de l'esprit humain*, texte revu et présenté par Prior O.H., nouvelle édition présentée par Belaval Y., Paris, Vrin, 1970, p. 205 (Dixième époque : « Les progrès futurs de l'esprit humain »).
- Casanova J., Devau N., Pettenati M., 2016. Managed aquifer recharge: an overview of issues and options, in : Jakeman A.J., Barreteau O., Hunt R.J., Rinaudo J.-D., Ross A. (éd.), *Integrated Groundwater Management: Concepts, approaches and challenges*, p. 413-434.
- Castello M., Bouchi-Lamontagne M., 2009. *Les Eaux souterraines en France*, BRGM Éditions, collection Les Enjeux des géosciences, 56 p.
- Catalano M.J., Bozek M.A., Pellett T.D., 2007. Effects of dam removal on fish assemblage structure and spatial distributions in the Baraboo River, Wisconsin. *North American Journal of Fisheries Management*, 27 (2), 519-530.
- Cerdà A., Keesstra S.D., Rodrigo-Comino J., Novara A., Pereira P., Brevik E. et al., 2017. Runoff initiation, soil detachment and connectivity are enhanced as a consequence of vineyards plantations. *Journal of Environmental Management*, 202, 268-275.
- Cerdà A., Rodrigo-Comino J., Giménez-Morera A., Novara A., Pulido M., Kapović-Solomun M., Keesstra S.D., 2018. Policies can help to apply successful strategies to control soil and water losses. The case of chipped pruned branches (CPB) in Mediterranean citrus plantations. *Land Use Policy*, 75, 734-745.
- Chan K.Y., 2001. An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity—implications for functioning in soils. *Soil and tillage research*, 57 (4), 179-191.
- Chancel L., 2022. Global carbon inequality over 1990-2019. *Nature Sustainability*, 5 (11), 931-938.
- Chancel L., Piketty T., 2017. Carbon and inequality: from Kyoto to Paris. Paris School of Economics.
- Chaves H.M., Camelo A.P.S., Mendes R.M., 2012. Groundwater discharge as affected by land use change in small catchments: A hydrologic and economic case study in Central Brazil, in Martin-Bordes H.J.L., Gurdak J.J. (éd.), *Climate Change Effects on Groundwater Resources: A Global Synthesis of Findings and Recommendations*, Taylor and Francis publishing, CRC Press, 49-62.

- Chen Z., Grasby S.E., Osadetz K.G., 2004. Relation between climate variability and groundwater levels in the upper carbonate aquifer, southern Manitoba, Canada. *Journal of Hydrology*, 290 (1-2), 43-62.
- Chertow M.R., 2000. The IPAT equation and its variants. *Journal of Industrial Ecology*, 4 (4), 13-29.
- Chong X.Y., Vericat D., Batalla R.J., Teo F.Y., Lee K.S.P., Gibbins C.N., 2021. A review of the impacts of dams on the hydro-morphology of tropical rivers. *Science of The Total Environment*, 794, 148686.
- Chorover J., Kretzschmar R., Garcia-Pichel F., Sparks D.L., 2007. Soil biogeochemical processes in the critical zone. *Elements*, 3, 321-326.
- Claassen R., Bowman M., McFadden J., Smith D., Wallander S., 2018. Tillage intensity and conservation cropping in the United States.
- Cohen-Shacham E., Walters G., Janzen C., Maginnis S., 2016. Nature-based solutions to address global societal challenges. *IUCN*, 97, 2016-2036.
- Collard A.-L., Montginoul M., Ait Mouheb N., Harmand J., 2025. Les eaux usées traitées : réallouer ou laisser couler ? in : Bouarfa S., Montginoul M., Pelte T., Sauquet É. (coord.), *Comment partager l'eau en France ? À l'ère de l'anthropocène*, Versailles, éditions Quæ, 167-180.
- Colmet-Daage A., Sanchez-Gomez E., Ricci S., Llovel C., Borrell Estupina V., Quintana-Seguí P. et al., 2018. Evaluation of uncertainties in mean and extreme precipitation under climate change for northwestern Mediterranean watersheds from high-resolution Med and Euro-CORDEX ensembles. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22 (1), 673-687.
- Colsaet A., Laurans Y., Levrel H., 2018. What drives land take and urban land expansion? A systematic review. *Land Use Policy*, 79, 339-349.
- Comité de bassin Loire-Bretagne, Préfète coordinatrice du bassin Loire-Bretagne, Agence de l'eau Loire-Bretagne, Dreal de bassin Loire-Bretagne et Office français de la biodiversité, 2022. SDAGE 2022-2027 Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux du bassin Loire-Bretagne, tome 1, orientations fondamentales.
- Concepcion G.B., Nelson S.G., 1999. Effects of a dam and reservoir on the distributions and densities of macrofauna in tropical streams of Guam (Mariana Islands). *Journal of Freshwater Ecology*, 14 (4), 447-454.
- Condom N., Molle B., Tomas S., Olivier Y., Audouard M., Granier J., 2013. La réutilisation maîtrisée des eaux usées : approfondir les connaissances pour lever les freins et relever les défis. *Sciences Eaux & Territoires* (2), 54-57.
- Cooley H., Gleick P.H., Wolff G., 2006. *Desalination, With a Grain of Salt. A California Perspective*, Oakland, Californie, Pacific Institute for Studies in Development, Environment and Security, 100 p.
- Cornette N., 2022. Impacts du changement climatique sur les ressources en eau de subsurface à l'horizon 2050-2100 dans un contexte de milieux de socle cristallin. thèse de doctorat, Université Rennes 1, France, 203 p.
- Corson-Dosch H.R., Nell C.S., Volentine R.E., Archer A.A., Bechtel E., Bruce J.L., Felts N., Gross T.A., Lopez-Trujillo D., Riggs C.E., Read E.K., 2023. *The water cycle: U.S. Geological Survey General Information Product 221*, 1 sheet, traduit en français par Simon Gascoin (CNRS), <https://pubs.usgs.gov/publication/gip221>.
- Cortes R.M.V., Ferreira M.T., Oliveira S.V., Godinho F., 1998. Contrasting impact of small dams on the macroinvertebrates of two Iberian Mountain rivers. *Hydrobiologia*, 389, 51-61.
- Costa M.H., Botta A., Cardille J.A., 2003. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. *Journal of Hydrology*, 283 (1-4), 206-217.
- Costanza R., De Groot R., Sutton P., Van der Ploeg S., Anderson S.J., Kubiszewski I. et al., 2014. Changes in the global value of ecosystem services. *Global environmental change*, 26, 152-158.
- Cour des comptes, 2023. Une organisation inadaptée aux enjeux de la gestion quantitative de l'eau, rapport public annuel 2023 : La décentralisation 40 ans après, [https://www.ccomptes.fr/system/files/2023-03/20230310-RPA-2023\\_0.pdf](https://www.ccomptes.fr/system/files/2023-03/20230310-RPA-2023_0.pdf).
- Creed I.F., Jones J.J., Archer Van Garderen E., Claassen M., Ellison D., McNulty S.G. et al., 2019. Managing forests for both downstream and downwind water. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2, 64.
- Crist E., 2012. Abundant Earth and the population question, in Cafaro P., Crist E. (éd.), *Life on the Brink: Environmentalists Confront Overpopulation*, Georgia, États-Unis, University of Georgia Press, p. 141-151.
- Crist E., Mora C., Engelman R., 2017. The interaction of human population, food production, and biodiversity protection. *Science* 356 (6335), 260-264.
- Curto D., Franzitta V., Guercio A., 2021. A review of the water desalination technologies. *Applied Sciences*, 11 (2), 670.
- Daily G.C., 1997. Introduction: what are ecosystem services. *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems*, 1 (1).

- Daily G.C., Ellison K., 2002. *The New Economy of Nature: The quest to make conservation profitable*, Washington, DC., Island Press, 260 p.
- Datry T., Larned S.T., Tockner K., 2014. Intermittent rivers: a challenge for freshwater ecology. *BioScience*, 64 (3), 229-235.
- De Angelis A., Dominguez F., Fan Y., Robock A., Kustu M.D., Robinson D., 2010. Evidence of enhanced precipitation due to irrigation over the Great Plains of the United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115 (D15).
- De Godoy Leski C., 2021. Vers une gouvernance anticipative des changements globaux. L'emprise des interdépendances socioécologiques sur une métropole estuarienne : Bordeaux Métropole et l'estuaire de la Gironde, thèse de doctorat, Université de Bordeaux, Bordeaux, 361 p.
- De Graaf I.E., Gleeson T., Van Beek L.R., Sutanudjaja E.H., Bierkens M.F., 2019. Environmental flow limits to global groundwater pumping. *Nature*, 574, 7776, 90-94.
- Debortoli N.S., Dubreuil V., Hirota M., Filho S.R., Lindoso D.P., Nabucet J., 2017. Detecting deforestation impacts in Southern Amazonia rainfall using rain gauges. *International Journal of Climatology*, 37 (6), 2889-2900.
- del Carmen Ponce-Rodríguez M., Carrete-Carreón F.O., Núñez-Fernández G.A., de Jesús Muñoz-Ramos J., Pérez-López M.E., 2021. Keyline in bean crop (*Phaseolus vulgaris* L.) for soil and water conservation. *Sustainability*, 13 (17), 9982.
- Del Giudice G., Rasulo G., Siciliano D., Padulano R., 2014. Combined effects of parallel and series detention basins for flood peak reduction. *Water Resources Management*, 28, 3193-3205.
- Delannoy I., 2017. *L'Économie symbiotique : Régénérer la planète, l'économie, la société*, Arles, Actes Sud, 352 p.
- Depres C., Grolleau G., Mzoughi N., 2008. Contracting for environmental property rights: the case of Vittel. *Economica*, 75 (299), 412-434.
- Derrouch D., Dessaint F., Felten É., Chauvel B., 2020. L'adoption du semis direct sous couvert végétal : transition douce ou rupture ? *Cahiers Agricultures*, 29, 5.
- Desage F., Guéranger D., 2011. *La Politique confisquée : Sociologie des réformes et des institutions intercommunales*, Vulaines-sur-Seine, Éditions du Croquant, 247 p.
- Di Baldassarre F., Castellarin A., Brath A., 2009. Analysis of the effects of levee heightening on flood propagation: example of the River Po, Italy. *Hydrological Sciences*, 54, 1007-17.
- Dillon P., Arshad M., 2016. Managed aquifer recharge in integrated water resource management, in Jakeman A.J., Barreteau O., Hunt R.J., Rinaldo J.D., Ross A. (éd.), *Integrated Groundwater Management: Concepts, approaches and challenges*, Cham, Allemagne, Springer, 435-452.
- Dillon P., Fernández Escalante E., Megdal S.B., Massmann G., 2020. Managed aquifer recharge for water resilience. *Water*, 12 (7), 1846.
- Döll P., 2002. Impact of climate change and variability on irrigation requirements: A global perspective. *Climatic Change*, 54, 269-293.
- Döll P., Hoffmann-Dobrev H., Portmann F.T., Siebert S., Eicker A., Rodell M., Scanlon B.R., 2012. Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variations. *Journal of Geodynamics*, 59, 143-156.
- Dong N., You Z., Yang C., Yang M., Wang W., 2019. Hydrological impact of a reservoir network in the upper Gan River Basin, China. *Hydrological Processes*, 33 (12), 1709-1723.
- Dörfliger N., 2015. De la carte géologique à la carte hydrogéologique, in Euzeu A., Jeandel C., Mosseri R. (éd.), *L'Eau à découvert*, CNRS Éditions, <https://books.openedition.org/editions-cnrs/9911?lang=fr>.
- Drapier L., Guerrin J., Pelet J., Brochet A., Fournier M., Fernandez S. et al., 2024. Les Solutions fondées sur la Nature (SfN) pour la gestion des risques liés à l'eau : quelle institutionnalisation du concept en France ? *LHB*, 2341030.
- Dulong D., 1996. Quand l'économie devient politique. La conversion de la compétence économique en compétence politique sous la V<sup>e</sup> République. *Politix. Revue des sciences sociales du politique*, 9 (35), 109-130.
- Duong K., Saphores JDM., 2015. Obstacles to wastewater reuse: an overview. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2 (3), 199-214.
- Dupraz P., Pech M., 2007. Effets des mesures agri-environnementales. *INRA Sciences sociales* (2-3), 1-4.
- Eggermont H., Balian E., Azevedo JMN., Beumer V., Brodin T., Claudet J. et al., 2015. Nature-based solutions: new influence for environmental management and research in Europe. *GAIA-Ecological Perspectives for Science and Society*, 24 (4), 243-248.
- Ehrlich P.R., Holdren J.P., 1971. Impact of population growth. *Science*, 171 (3977), 1212-1217.

- Ehrlich P.R., Holdren J.P., 1972. A bulletin dialogue on the 'Closing Circle': Critique: One dimensional ecology. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 28 (5), 16-27.
- Eisel L.M., Bradley K.M., Leaf C.F., 1990. Estimated runoff from man-made snow. *Journal of the American Water Resources Association*, 26 (3), 519-526.
- Eisel L.M., Mills K.D., Leaf C.F., 1988. Estimated consumptive loss from man-made snow. *Journal of the American Water Resources Association*, 24 (4), 815-820.
- Eisenbies M.H., Aust W.M., Burger J.A., Adams M.B., 2007. Forest operations, extreme flooding events, and considerations for hydrologic modeling in the Appalachians — A review. *Forest Ecology and Management*, 242 (2-3), 77-98.
- Ekka S.A., Rujiar H., Leonhardt G., Blecken G.T., Viklander M., Hunt W.F., 2021. Next generation swale design for storm-water runoff treatment: A comprehensive approach. *Journal of Environmental Management*, 279, 111756.
- El-Dessouky H.T., Ettouney H.M., 2002. *Fundamentals of salt water desalination*. Elsevier.
- Elliot W.J., Page-Dumroese D., Robichaud P.R., 1999. The effects of forest management on erosion and soil productivity, in R. Ratta, R. Lal (éd.), *Soil Quality and Soil Erosion*, Boca Raton, États-Unis, CRC Press, 195-208.
- Ellison A.M., Bank M.S., Clinton B.D., Colburn E.A., Elliott K., Ford C.R., Mohan J., 2005. Loss of foundation species: consequences for the structure and dynamics of forested ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 3 (9), 479-486.
- Ellison D., Morris C.E., Locatelli B., Sheil D., Cohen J., Murdiyarso D., Gaveau D., 2017. Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*, 43, 51-61.
- Elosegi A., Díez J., Mutz M., 2010. Effects of hydromorphological integrity on biodiversity and functioning of river ecosystems. *Hydrobiologia*, 657, 199-215.
- Elsaid K., Kamil M., Sayed E.T., Abdelkareem M.A., Wilberforce T., Olabi A., 2020. Environmental impact of desalination technologies: A review. *Science of the Total Environment*, 748, 141528.
- Engelman R., 2016. Nine population strategies to stop short of 9 billion, in H. Washington, P. Twomey (éd.), *A Future Beyond Growth*, Londres, Routledge, p. 56-66.
- Eshleman K.N., 2004. Hydrological consequences of land use change: A review of the state-of-science. *Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, 153, 13-29.
- Etrillard C., 2015. Contrats et écosystèmes agricoles. Des mesures agroenvironnementales aux paiements pour services environnementaux. *Droit de l'environnement [La revue jaune]*, (237), 293-303.
- Évin G., Hingray B., Reverdy A., Ducharme A., Sauquet É., 2024. Ensemble de projections Explorez : Changements moyens et incertitudes associées. *Recherche Data Govv*, V2.
- Eyl-Mazzega M.-A., Cassignol E., 2022. Géopolitique du dessalement de l'eau de mer. *Études de l'IFRI*, 34 p.
- Falkenmark M., Wang-Erlandsson L., Rockström J., 2019. Understanding of water resilience in the Anthropocene. *Journal of Hydrology X*, 2, 100009.
- Fan Y., Miguez-Macho G., Jobbágy E.G., Jackson R.B., Otero-Casal C., 2017. Hydrologic regulation of plant rooting depth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114 (40), 10572-10577.
- FAO, 2019. *The State of the World's Biodiversity for Food and Agriculture* (J. Bélanger, D. Pilling, éd.), Rome, Italie, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture Assessments, 572 p.
- Farah-Pérez A., Umaña-Villalobos G., Picado-Barboza J., Anderson E.P., 2020. An analysis of river fragmentation by dams and river dewatering in Costa Rica. *River Research and Applications*, 36 (8), 1442-1448.
- Farley K.A., Jobbágy E.G., Jackson R.B., 2005. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology*, 11 (10), 1565-1576.
- Federal Interagency Stream Restoration Working Group, 1998. Stream corridor restoration: Principles, processes, and practices, Federal Interagency Stream Restoration Working Group.
- Fedoroff N.V., Battisti D.S., Beachy R.N., Cooper P.J., Fischhoff D.A., Hodges C.N., Reynolds M.P., 2010. Radically rethinking agriculture for the 21<sup>st</sup> century. *Science*, 327 (5967), 833-834.
- Felfelani F., Wada Y., Longuevergne L., Pokhrel Y.N., 2017. Natural and human-induced terrestrial water storage change: A global analysis using hydrological models and GRACE. *Journal of Hydrology*, 553, 105-118.
- FEP, 2019. Manifeste pour une eau durable. La gestion publique, un choix d'avenir pour les territoires, France Eau publique, FNCCR, Paris.

- Feuillette S., Montginoul M., Barles S., Taisne R., Wittling C., 2025. Quelle sobriété en eau ? in : Bouarfa S., Montginoul M., Pelte T., Sauquet É. (coord.), *Comment partager l'eau en France ? À l'ère de l'anthropocène*, Versailles, éditions Quæ, 119-134.
- FitzHugh T.W., Vogel R.M., 2011. The impact of dams on flood flows in the United States. *River Research and Applications*, 27 (10), 1192-1215.
- Florsheim J.L., Pellerin B.A., Oh N.H., Ohara N., Bachand P.A.M., Bachand S.M. *et al.*, 2011. From deposition to erosion: Spatial and temporal variability of sediment sources, storage, and transport in a small agricultural watershed. *Geomorphology*, 132 (3-4), 272-286.
- Foley J.A., Costa M.H., Delire C., Ramankutty N., Snyder P., 2003. Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1 (1), 38-44.
- Forzieri G., Bianchi A., Silva F.B., Herrera M.A.M., Leblois A., Laval C. *et al.*, 2018. Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe. *Global Environmental Change*, 48, 97-107.
- France 3, 2020. Vosges : la forêt pourrait flamber comme dans le Sud de la France, <https://france3-regions.francetvinfo.fr/grand-est/vosges/vosges-foret-pourrait-flamber-sud-france-1884684.html> (consulté le 21/10/2025).
- Franzluebbers A.J., 2002. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil and Tillage research*, 66 (2), 197-205.
- Fressoiz J.B., Bonneuil C., 2017. Growth unlimited: The idea of infinite growth from fossil capitalism to green capitalism, in Borowy I., Schmelzer M. (éd.), *History of the Future of Economic Growth*, Londres, Routledge, p. 52-68.
- Friedrich T., Derpsch R., Kassam A., 2012. Overview of the global spread of conservation agriculture. *Field actions science reports. The Journal of Field Actions*, Special Issue 6.
- Gabbud C., Lane S.N., 2016. Ecosystem impacts of Alpine water intakes for hydropower: the challenge of sediment management. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3 (1), 41-61.
- Ganivet E., 2020. Growth in human population and consumption both need to be addressed to reach an ecologically sustainable future. *Environment, Development and Sustainability*, 1-20.
- Ganivet E., 2023. Eau, territoires et changements globaux : vers une approche systémique et participative de modélisation pour concevoir et agir en complexité. thèse de doctorat, Université de Rennes.
- Ganivet E., Thenet M., Crinière S., 2024a. Trajectoire Eau et Territoire — Mode d'emploi pour l'animation de l'outil, guide méthodologique, Water Family, 26 p.
- Ganivet E., Van Tilbeurg V., Congretel M., Longuevergne L., 2024b. Gestion intégrée de l'eau et changements globaux face aux logiques de l'action administrative locale. *Vertigo, La Revue électronique en sciences de l'environnement*, 24 (1), <https://journals.openedition.org/vertigo/43427>.
- Ganivet E., Van Tilbeurg V., Congretel M., Longuevergne L., 2024c. Eau et Territoire : une méthodologie participative et anticipatrice pour une prise en compte locale des changements globaux. *GéoProximité*S, 1.
- García S., 2002. Rendements et efficacité dans les industries en réseau : le cas des services d'eau potable délégués. *Économie & Prévision*, 154 (3), 123-138.
- García-Díaz A., Bienes R., Sastre B., Novara A., Gristina L., Cerdà A., 2017. Nitrogen losses in vineyards under different types of soil groundcover. A field runoff simulator approach in central Spain. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 236, 256-267.
- Gebhard C.A., Büchi L., Liebisch F., Sinaj S., Ramseier H., Charles R., 2013. Screening de légumineuses pour couverts végétaux : azote et adventices. *Recherche agronomique suisse*, 4 (9), 384-393.
- Gerten D., Rost S., von Bloh W., Lucht W., 2008. Causes of change in 20<sup>th</sup> century global river discharge. *Geophysical Research Letters*, 35 (20).
- Ghazavi G., Thomas Z., Hamon Y., Marie J.C., Corson M., Mérot P., 2008. Hedgerow impacts on soil-water transfer due to rainfall interception and root-water uptake. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22 (24), 4723-4735.
- Ghernaout D., 2018. Increasing trends towards drinking water reclamation from treated wastewater. *World Journal of Applied Chemistry*, 3 (1), 1-9.
- Ghiotti S., 2007. *Les Territoires de l'eau : Gestion et développement en France*, Paris, CNRS Éditions, 248 p.
- Giambastiani Y., Biancofiore G., Mancini M., Di Giorgio A., Giusti R., Cecchi S. *et al.*, 2022. Modelling the effect of keyline practice on soil erosion control. *Land*, 12 (1), 100.
- Gilbert C., Henry E., 2012. La définition des problèmes publics : entre publicité et discrétion. *Revue française de sociologie*, 53, 1, 35-59.

- Giller K.E., Hijbeek R., Andersson J.A., Sumberg J., 2021. Regenerative agriculture: an agronomic perspective. *Outlook on agriculture*, 50 (1), 13-25.
- Gleeson T., Richter B., 2018. How much groundwater can we pump and protect environmental flows through time? Presumptive standards for conjunctive management of aquifers and rivers. *River Research and Applications*, 34 (1), 83-92.
- Global Wealth Report, 2018. Global Wealth Report – 2018 edition. Crédit Suisse.
- Gneezy U., Meier S., Rey-Biel P., 2011. When and why incentives (don't) work to modify behavior. *Journal of Economic Perspectives*, 25 (4), 191-210.
- Goderniaux P., Davy P., Bresciani E., de Dreuzey J.R., Le Borgne T., 2013. Partitioning a regional groundwater flow system into shallow local and deep regional flow compartments. *Water Resources Research*, 49, 2274-2286.
- Govaerts B., Fuentes M., Mezzalama M., Nicol J.M., Deckers J., Etchevers J.D. *et al.*, 2007. Infiltration, soil moisture, root rot and nematode populations after 12 years of different tillage, residue and crop rotation managements. *Soil and Tillage Research*, 94 (1), 209-219.
- Graber F., 2022. Inutilité publique. *Histoire d'une culture politique française*, Amsterdam éditions, 208 p.
- Graf W.L., 2006. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. *Geomorphology*, 79 (3-4), 336-360.
- Greening L.A., Greene D.L., Difiglio C., 2000. Energy efficiency and consumption — the rebound effect — a survey. *Energy Policy*, 28, 389-401.
- Grolleau G., McCann L.M., 2012. Designing watershed programs to pay farmers for water quality services: Case studies of Munich and New York City. *Ecological Economics*, 76, 87-94.
- Grünewald T., Wolfesperger F., 2019. Water losses during technical snow production: Results from field experiments. *Frontiers in Earth Science*, 7, 435385.
- Guichard L., Dedieu F., Jeuffroy M.H., Meynard J.M., Reau R., Savini I., 2017. Le plan Ecophyto de réduction d'usage des pesticides en France : décryptage d'un échec et raisons d'espérer. *Cahiers agricoles*, 26 (1), 14002.
- Gurnell A., Surian N., Zanoni L., 2009. Multi-thread river channels: a perspective on changing European alpine river systems. *Aquatic Sciences*, 71, 253-265.
- Guzha A.C., Nobrega R.L., Kovacs K., Rebola-Lichtenberg J., Amorim R.S., Gerold G., 2015. Characterizing rainfall-runoff signatures from micro-catchments with contrasting land cover characteristics in southern Amazonia. *Hydrological Processes*, 29 (4), 508-521.
- Guzha A.C., Rufino M.C., Okoth S., Jacobs S., Nóbrega R.L.B., 2018. Impacts of land use and land cover change on surface runoff, discharge and low flows: Evidence from East Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 15, 49-67.
- Haapalehto T., Kotiaho J.S., Matilainen R., Tahvanainen T., 2014. The effects of long-term drainage and subsequent restoration on water table level and pore water chemistry in boreal peatlands. *Journal of Hydrology*, 519, 1493-1505.
- Habets F., Molénat J., Carlier N., Douez O., Leenhardt D., 2018. The cumulative impacts of small reservoirs on hydrology: A review. *Science of the Total Environment*, 643, 850-867.
- Haddeland I., Heinke J., Biemans H., Eisner S., Flörke M., Hanasaki N., Stacke T., 2014. Global water resources affected by human interventions and climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111 (9), 3251-3256.
- Hadji R., Limani Y., Demdoum A., Zighmi K., Zahri F., Chouabi A., 2014. Climate change and its influence on shrinkage-swelling clays susceptibility in a semi-arid zone: a case study of Souk Ahras municipality, NE-Algeria. *Desalination and Water Treatment*, 52 (10-12), 2057-2072.
- Hamant O., 2023. *Antidote au culte de la performance : la robustesse du vivant*, Paris, Gallimard (collection Tracts, n° 50).
- Hamza M.A., Anderson W.K., 2005. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 82 (2), 121-145.
- Hannah L., Roehrdanz P.R., Ikegami M., Shepard A.V., Shaw M.R., Tabor G., Hijmans R.J., 2013. Climate change, wine, and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110 (17), 6907-6912.
- Hanson H.J., Wickenburg B., Olsson J.A., 2020. Working on the boundaries— How do science use and interpret the nature-based solution concept? *Land Use Policy*, 90, 104302.
- Hartog N., Stuyfzand P.J., 2017. Water quality considerations on the rise as the use of managed aquifer recharge systems widens. *Water*, 9, 808.
- Harvey R.G., Loftus W.F., Rehage J.S., Mazzotti F.J., 2011. *Effects of Canals and Levees in Everglades Ecosystems: WEC304/UW349*, 12/2010. EDIS.



- Havril T., Tóth Á., Molson J.W., Galsa A., Mádl-Szőnyi J., 2018. Impacts of predicted climate change on groundwater flow systems: Can wetlands disappear due to recharge reduction? *Journal of Hydrology*, 563, 1169-1180.
- Hayhoe K., Cayan D., Field C.B., Frumhoff P.C., Maurer E.P., Miller N.L., Dale L., 2004. Emissions pathways, climate change, and impacts on California. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101 (34), 12422-12427.
- Hellier E., Carré C., Dupont N., Laurent F., Vaucelle S., 2009. *La France, la ressource en eau-usages, fonctions et enjeux territoriaux*, Paris, Armand Colin, 309 p.
- Hernandez S., Benoît M., 2011. Gestion durable de la ressource en eau : l'utilisation du paiement pour service environnemental au service de la protection des captages. *Annales des Mines — Responsabilité et environnement*, (3), 87-95.
- Herrington G., 2021. Update to limits to growth: Comparing the World3 model with empirical data. *Journal of Industrial Ecology*, 25 (3), 614-626.
- Hiscock K., Sparkes R., Hodgson A., 2012. Evaluation of future climate change impacts on European groundwater resources. *Climate change effects on groundwater resources: a global synthesis of findings and recommendations*, 414.
- Hobbs R.J., Harris J.A., 2001. Restoration ecology: repairing the earth's ecosystems in the new millennium. *Restoration Ecology*, 9 (2), 239-246.
- Hoekstra A.Y., Mekonnen M.M., 2012. The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109 (9), 3232-3237.
- Hoekstra A.Y., 2015. The water footprint of industry, in Klemeš J.J. (éd.), *Assessing and Measuring Environmental Impact and Sustainability*, Oxford, Royaume-Uni, Butterworth-Heinemann, 221-254.
- Hogeboom R.J., Knook L., Hoekstra A.Y., 2018. The blue water footprint of the world's artificial reservoirs for hydroelectricity, irrigation, residential and industrial water supply, flood protection, fishing and recreation. *Advances in Water Resources*, 113, 285-294.
- Hohensinner S., Habersack H., Jungwirth M., Zauner G., 2004. Reconstruction of the characteristics of a natural alluvial river-floodplain system and hydromorphological changes following human modifications: the Danube River (1812-1991). *River Research and Applications*, 20 (1), 25-41.
- Holden J., Chapman P.J., Lane S.N., Brookes C., 2006. Impacts of artificial drainage of peatlands on runoff production and water quality. *Developments in Earth Surface Processes*, 9, 501-528.
- Holden J., Evans M.G., Burt T.P., Horton M., 2006. Impact of land drainage on peatland hydrology. *Journal of Environmental Quality*, 35 (5), 1764-1778.
- Horn R., 2003. Stress-strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. *Geoderma*, 116 (1-2), 77-88.
- Hrdinka T., Novický O., Hanslík E., Rieder M., 2012. Possible impacts of floods and droughts on water quality. *Journal of Hydro-Environment Research*, 6 (2), 145-150.
- Hubacek K., Baiocchi G., Feng K., Castillo R.M., Sun L., Xue J., 2017. Global income inequality and carbon footprints: Can we have the cake and eat it too? In : Dejuán Ó., Lenzen M., Cadarso M.Á. (éd.), *Environmental and Economic Impacts of Decarbonization*, Routledge, 111-124.
- Hughes A.C., Tougeron Óscar K., Martin D.A., Menga F., Rosado B.H. et al., 2023. Smaller human populations are neither a necessary nor sufficient condition for biodiversity conservation. *Biological Conservation*, 277, 109841.
- Humphries P., Wohl E., Agostinho A.A., Kopf R.K., McCasker N., Moyle P., Thorp J., 2024. Flood ecology. *BioScience*, bio038.
- Huscroft J., Gleeson T., Hartmann J., Börker J., 2018. Compiling and mapping global permeability of the unconsolidated and consolidated earth: GLOBAL Hydrogeology MaPS 2.0 (G.L.H.Y.M.P.S. 2.0). *Geophysical Research Letters*, 45 (4), 1897-1904.
- Imig A., Szabó Z., Halytsia O., Vrachlioli M., Kleinert V., Rein A., 2022. A review on risk assessment in managed aquifer recharge. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 18 (6), 1513-1529.
- Insee, 2023. Agriculture : entre sécheresse précoce et marchés déstabilisés, Bilan économique 2022, Occitanie.
- IPBES, 2018. Biodiversity and Nature's contributions continue dangerous decline, scientists warn, Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES), media release.
- IPBES, 2019. Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.
- IPBES, 2022. Sustainable use of wild species assessment summary for policymakers.



- IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis, contribution of Working Group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A. *et al.* [éd.]), Cambridge, Royaume-Uni, et New York, États-Unis, Cambridge University Press, United.
- IPCC, 2022a. Climate Change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability, contribution of Working Group II to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Pörtner H.-O., Roberts D.C., Tignor M. *et al.* [éd.]), Cambridge, Royaume-Uni, et New York, États-Unis, Cambridge University Press, United.
- IPCC, 2022b. Climate Change 2022: Mitigation of climate change, contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Shukla P.R., Skea J., Slade R. *et al.* [éd.]), Cambridge, Royaume-Uni, et New York, États-Unis, Cambridge University Press, United.
- Islam N., Winkel J., 2017. Climate change and social inequality. DESA Working Paper n° 152, Department of Economic and Social Affairs, UN Secretariat, New York.
- IUCN, 2009. No Time to Lose: Make Full Use of Nature-Based Solutions in the Post-2012 Climate Change Regime, Position Paper on the Fifteenth Session of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (COP 15), International Union for Conservation of Nature, IUCN, Gland, CH.
- Jack B.K., Kousky C., Sims K.R., 2008. Designing payments for ecosystem services: Lessons from previous experience with incentive-based mechanisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105 (28), 9465-9470.
- Jacob D., Petersen J., Eggert B., Alias A. *et al.*, 2014. EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14 (2), 563-578.
- Jacques P., Delannoy L., Andrieu B., Yilmaz D., Jeanmart H., Godin A., 2023. Assessing the economic consequences of an energy transition through a biophysical stock-flow consistent model. *Ecological Economics*, 209, 107832.
- Jankowfsky S., Branger F., Braud I., Gironás J., Rodríguez F., 2013. Comparison of catchment and network delineation approaches in complex suburban environments: application to the Chaudanne catchment, France. *Hydrological Processes*, 27 (25), 3747-3761.
- Jaramillo M.F., Restrepo I., 2017. Wastewater reuse in agriculture: A review about its limitations and benefits. *Sustainability*, 9 (10), 1734.
- Jasechko S., Perrone D., 2021. Global groundwater wells at risk of running dry. *Science*, 372, 6540., 418-421.
- Jasechko S., Sharp Z.D., Gibson J.J., Birks S.J., Yi Y., Fawcett P.J., 2013. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature*, 496, 7445., 347-350.
- Jevons W.S., 1866. *The Coal Question*, Londres, Royaume-Uni, Macmillan and Compagny.
- Jiménez-Cisneros B., 1995. Wastewater reuse to increase soil productivity. *Water Science and Technology*, 32 (12), 173-180.
- Johansson E.L., Brogaard S., Brodin L., 2022. Envisioning sustainable carbon sequestration in Swedish farmland. *Environmental Science & Policy*, 135, 16-25.
- Jones E., Qadir M., Van Vliet M.T., Smakhtin V., Kang S.M., 2019. The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of the Total Environment*, 657, 1343-1356.
- Jones K.E., Patel N.G., Levy M.A., Storeygard A., Balk D., Gittleman J.L., Daszak P., 2008. Global trends in emerging infectious diseases. *Nature*, 451 (7181), 990-993.
- Jones L., Banks V., Jefferson I., 2020. Swelling and shrinking soils. Geological Hazards in the UK: Their Occurrence, Monitoring and Mitigation, Engineering Group Working Party Report, D.P. Giles, J.S. Griffiths.
- Joo S.H., Tansel B., 2015. Novel technologies for reverse osmosis concentrate treatment: A review. *Journal of Environmental Management*, 150, 322-335.
- Josre S., 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry Systems*, 76, 1-10.
- Kalogirou S.A., 2005. Seawater desalination using renewable energy sources. *Progress in Energy and Combustion Science*, 31 (3), 242-281.
- Kay S., Graves A., Palma J.H., Moreno G., Rocas-Díaz J.V., Aviron S. *et al.*, 2019. Agroforestry is paying off-Economic evaluation of ecosystem services in European landscapes with and without agroforestry systems. *Ecosystem Services*, 36, 100896.
- Keesstra S., Nunes J., Novara A., Finger D., Avelar D., Kalantari Z., Cerdà A., 2018. The superior effect of nature based solutions in land management for enhancing ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 610, 997-1009.
- Keesstra S., Pereira P., Novara A., Brevik E.C., Azorin-Molina C., Parras-Alcántara L. *et al.*, 2016. Effects of soil management techniques on soil water erosion in apricot orchards. *Science of the Total Environment*, 551, 357-366.

- Keesstra S., Sannigrahi S., López-Vicente M., Pulido M., Novara A., Visser S., Kalantari Z., 2021. The role of soils in regulation and provision of blue and green water. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 376 (1834), 20200175.
- Kesel R.H., 2003. Human modifications to the sediment regime of the Lower Mississippi River flood plain. *Geomorphology*, 56 (3-4), 325-334.
- Khalid S., Shahid M., Natasha Bibi I., Sarwar T., Shah A.H., Niazi N.K., 2018. A review of environmental contamination and health risk assessment of wastewater use for crop irrigation with a focus on low and high-income countries. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15 (5), 895.
- Kirsch S., 2010. Sustainable mining. *Dialectical Anthropology*, 34, 87-93.
- Kladivko E.J., 2001. Tillage systems and soil ecology. *Soil and Tillage Research*, 61 (1-2), 61-76.
- Kløve B., Ala-Aho P., Bertrand G., Gurdak J.J., Kupfersberger H., Kværner J., Uvo C.B., 2014. Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. *Journal of Hydrology*, 518, 250-266.
- Knighton D., 2014. *Fluvial Forms and Processes: A new perspective*, Oxford, Royaume-Uni, Routledge, 400 p.
- Kondolf G.M., 1997. Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental Management*, 21 (4), 533-551.
- Kondolf G.M., 2006. River restoration and meanders. *Ecology and Society*, 11 (2).
- Kondolf G.M., Batalla R.J., 2005. Hydrological effects of dams and water diversions on rivers of Mediterranean-climate regions: examples from California. *Developments in Earth Surface Processes*, 7, 197-211.
- Kondolf G.M., Rubin Z.K., Minear J.T., 2014. Dams on the Mekong: Cumulative sediment starvation. *Water Resources Research*, 50 (6), 5158-5169.
- Kondolf G.M., Smeltzer M.W., Railsback S.F., 2001. Design and performance of a channel reconstruction project in a coastal California gravel-bed stream. *Environmental Management*, 28, 761-776.
- Konikow L.F., Kendy E., 2005. Groundwater depletion: A global problem. *Hydrogeology Journal*, 13, 317-320.
- Kopnina H., Washington H., 2016. Discussing why population growth is still ignored or denied. *Chinese Journal of Population Resources and Environment*, 14 (2), 133-143.
- Krausmann F., Erb K.H., Gingrich S., Lauk C., Haberl H., 2008. Global patterns of socioeconomic biomass flows in the year 2000: A comprehensive assessment of supply, consumption and constraints. *Ecological Economics*, 65 (3), 471-487.
- Kucera J., 2019. *Desalination: Water from water*, Hoboken N.J., États-Unis, John Wiley & Sons.
- Kustu M.D., Fan Y., Rodell M., 2011. Possible link between irrigation in the US High Plains and increased summer streamflow in the Midwest. *Water Resources Research*, 47 (3).
- Lafuite A.S., 2017. Érosion de la biodiversité et durabilité des systèmes socio-écologiques, thèse de doctorat, Université Toulouse III–Paul-Sabatier, Toulouse.
- Lau J.K., Lauer T.E., Weinman M.L., 2006. Impacts of channelization on stream habitats and associated fish assemblages in east central Indiana. *The American Midland Naturalist*, 156 (2), 319-330.
- Laurans Y., Leménager T., Aoubid S., 2011. Les paiements pour services environnementaux. De la théorie à la mise en œuvre, quelles perspectives dans les pays en développement ? Agence française de développement, 218 p.
- Lavarde P., Cinotti B., Torterotot J.-P., Galibert T., Haddouche N., Scarbonchi F., 2022. L'organisation territoriale de l'État en matière de politique de l'eau et de la pêche en eau douce — Scénarios d'évolution pour une politique publique mieux intégrée, Conseil général de l'environnement et du développement durable, Inspection générale de l'administration, rapport CGEDD n° 013891-01, IGA n° 21037-R, <https://www.interieur.gouv.fr/fr/Publications/Rapports-de-l-IGA/Rapports-recents/Organisation-territoriale-de-l-Etat-en-matiere-de-politique-de-l-eau-et-de-peche-en-eau-douce> (consulté le 02/10/2025).
- Lawrence D., Vandecar K., 2015. Effects of tropical deforestation on climate and agriculture. *Nature Climate Change*, 5 (1), 27-36.
- Lawrence S., Liu Q., Yakovenko V.M., 2013. Global inequality in energy consumption from 1980 to 2010. *Entropy*, 15 (12), 5565-5579.
- Le Bissonnais Y., Cerdan O., Lecomte V., Benkhadra H., Souchère V., Martin P., 2005. Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. *Catena*, 62 (2-3), 111-124.
- Lee K., Jepson W., 2021. Environmental impact of desalination: A systematic review of Life Cycle Assessment. *Desalination*, 509, 115066.

- Lee L.J.E., Lawrence D.S.L., Price M., 2006. Analysis of water-level response to rainfall and implications for recharge pathways in the Chalk aquifer, SE England. *Journal of Hydrology*, 330 (3-4), 604-620.
- Lee S., Chu M.L., Guzman J.A., Botero-Acosta A., 2021. A comprehensive modeling framework to evaluate soil erosion by water and tillage. *Journal of Environmental Management*, 279, 111631.
- Legros C., 2024. La démocratie de l'eau, une promesse inachevée. *Le Monde*, [https://www.lemonde.fr/idees/article/2024/09/06/la-democratie-de-l-eau-une-promesse-inachevee\\_6305797\\_3232.html](https://www.lemonde.fr/idees/article/2024/09/06/la-democratie-de-l-eau-une-promesse-inachevee_6305797_3232.html) (consulté le 02/10/2025).
- Leigh C., Boulton A.J., Courtwright J.L., Fritz K., May C.L., Walker R.H., Datry T., 2016. Ecological research and management of intermittent rivers: an historical review and future directions. *Freshwater Biology*, 61 (8), 1181-1199.
- Lemasson C., Pierre P., Osson B., 2008. Rénovation des prairies et sursemis. Comprendre, raisonner et choisir la méthode. *Fourrages*, 195, 315-330.
- Lessard J.L., Hayes D.B., 2003. Effects of elevated water temperature on fish and macroinvertebrate communities below small dams. *River Research and Applications*, 19 (7), 721-732.
- Li J., Zhou K., Xie B., Xiao J., 2021. Impact of landscape pattern change on water-related ecosystem services: Comprehensive analysis based on heterogeneity perspective. *Ecological Indicators*, 133, 108372.
- Li S., Lobb D.A., Lindstrom M.J., Farenhorst A., 2007. Tillage and water erosion on different landscapes in the northern North American Great Plains evaluated using <sup>137</sup>Cs technique and soil erosion models. *Catena*, 70 (3), 493-505.
- Ligon F.K., Dietrich W.E., Trush W.J., 1995. Downstream ecological effects of dams. *BioScience*, 45 (3), 183-192.
- Lipiec J., Kuś J., Słowińska-Jurkiewicz A., Nosalewicz A., 2006. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. *Soil and Tillage research*, 89 (2), 210-220.
- Lipiec J., Stępniewski W., 1995. Effects of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients. *Soil and Tillage Research*, 35 (1-2), 37-52.
- Liu H.H., 2011. Impact of climate change on groundwater recharge in dry areas: An ecohydrology approach. *Journal of Hydrology*, 407 (1-4), 175-183.
- Liu W., Wei X., Fan X., Guo X., Liu Y., Zhang M., Li Q., 2015. Response of flow regimes to deforestation and reforestation in a rain-dominated large watershed of subtropical China. *Hydrological Processes*, 29 (24), 5003-5015.
- Lobell D.B., Burke M.B., Tebaldi C., Mastrandrea M.D., Falcon W.P., Naylor R.L., 2008. Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. *Science*, 319 (5863), 607-610.
- Lobera G., Batalla R.J., Vericat D., López-Tarazón J.A., Tena A., 2016. Sediment transport in two Mediterranean regulated rivers. *Science of the Total Environment*, 540, 101-113.
- López-Moreno J.I., Vicente-Serrano S.M., Beguería S., García-Ruiz J.M., Portela M.M., Almeida A.B., 2009. Dam effects on droughts magnitude and duration in a transboundary basin: The Lower River Tagus, Spain and Portugal. *Water Resources Research*, 45 (2).
- Lorenzo-Lacruz J., Vicente-Serrano S.M., González-Hidalgo J.C., López-Moreno J.I., Cortesi N.J.C.R., 2013. Hydrological drought response to meteorological drought in the Iberian Peninsula. *Climate Research*, 58 (2), 117-131.
- Maaß A.L., Schüttrumpf H., Lehmkühl F., 2021. Human impact on fluvial systems in Europe with special regard to today's river restorations. *Environmental Sciences Europe*, 33 (1), 119.
- MacKinnon K., Sobrevila C., Hickey V., 2008. Biodiversity, Climate Change and adaptation: Nature-Based solutions from the World Bank Portfolio, World Bank, Washington, D.C., n° 46726, p. 1-112.
- Magilligan F.J., Nislow K.H., 2001. Long-term changes in regional hydrologic regime following impoundment in a humid-climate watershed. *Journal of the American Water Resources Association*, 37 (6), 1551-1569.
- Mahmood R., Pielke R.A., Hubbard K.G., Niyogi D., Dirmeyer P.A., McAlpine C., Baker B., 2014. Land cover changes and their biogeophysical effects on climate. *International Journal of Climatology*, 34 (4), 929-953.
- Maja M.M., Ayano S.F., 2021. The impact of population growth on natural resources and farmers' capacity to adapt to climate change in low-income countries. *Earth Systems and Environment*, 5, 271-283.
- Majnoni d'Intignano S., 2024. *En finir avec les idées fausses sur l'agriculture*, Ivry-sur-Seine, Les éditions de l'atelier, 160 p.
- Makarieva A.M., Gorshkov V.G., 2007. Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11 (2), 1013-1033.
- Malaeb L., Ayoub G.M., 2011. Reverse osmosis technology for water treatment: State of the art review. *Desalination*, 267 (1), 1-8.

- Malaterre P.O., Dorchies D., Baume J.P., 2013. La modernisation des canaux d'irrigation : apports de l'automatisation pour la gestion opérationnelle. *Sciences eaux et territoires*, (2), 44-47.
- Malm A., Hornborg A., 2014. The geology of mankind? A critique of the Anthropocene narrative. *The Anthropocene Review*, 1 (1), 62-69.
- Manichon H., 2022. Observation morphologique de l'état structural et mise en évidence d'effets de compactage des horizons travaillés, in Goss M.J., Monnier G. (éd.), *Soil Compaction and Regeneration*, Londres, Royaume-Uni, Routledge, p. 39-52
- Marson P., Corre L., Soubeyroux J.M., Sauquet E., Robin Y. *et al.*, 2024. Explorez : rapport de synthèse sur les projections climatiques régionalisées, Météo France, INRAE, Institut Pierre-Simon Laplace, <https://hal.inrae.fr/hal-04443633> (consulté le 02/10/2025).
- Martínez-Alvarez V., González-Ortega M.J., Martín-Gorriñ B., Soto-García M., Maestre-Valero J.F., 2017. The use of desalinated seawater for crop irrigation in the Segura River Basin (south-eastern Spain). *Desalination*, 422, 153-164.
- Massot A., Pressurot A., Trouillet M., Hassenforder E., 2021. Le contexte de la participation citoyenne dans la gestion de l'eau en France. *Sciences Eaux & Territoires*, 35 (1), 6-13.
- Mayol A., 2017. Social and nonlinear tariffs on drinking water: Cui bono? empirical evidence from a natural experiment in France. *Revue d'économie politique* (6), 1161-1185.
- Mayol A., Porcher S., 2019. Tarifs discriminants et monopoles de l'eau potable : une analyse de la réaction des consommateurs face aux distorsions du signal-prix. *Revue économique* (0), 461-494.
- Mazurski K.R., 1991. Communism and the Environment. *Forum for Applied Research and Public Policy* 5 (4), 39-44.
- McDermid S., Nocco M., Lawston-Parker P., Keune J., Pokhrel Y., Jain M. *et al.*, 2023. Irrigation in the Earth system. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1-19.
- McLeman R., Smit B., 2006. Migration as an adaptation to climate change. *Climatic Change*, 76 (1-2), 31-53.
- MEA, 2003. *Ecosystems and Human Well-Being: A framework for assessment*, Washington, Millennium Ecosystem Assessment, World Resources Institute, 266 p.
- Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens W.W., 1972. *The Limits to Growth*, New York, États-Unis, Universe Book.
- Meffe G.K., 1994. Human population control: the missing awareness. *Conservation Biology*, 8 (1), 310-313.
- Mehring M., Mehlhaus N., Ott E., Hummel D., 2020. A systematic review of biodiversity and demographic change: A misinterpreted relationship? *Ambio*, 49, 1297-1312.
- Mekonnen M.M., Gerbens-Leenes W., 2020. The water footprint of global food production. *Water*, 12 (10), 2696.
- Menberu M.W., Haghighi A.T., Ronkanen A.K., Marttila H., Kløve B., 2018. Effects of drainage and subsequent restoration on peatland hydrological processes at catchment scale. *Water Resources Research*, 54 (7), 4479-4497.
- Merchant E.K., 2021. *Building the Population Bomb*, Oxford, Royaume-Uni, Oxford University Press.
- Merten G.H., Araújo A.G., Biscaia R.C.M., Barbosa G.M.C., Conte O., 2015. No-till surface runoff and soil losses in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 152, 85-93.
- Messenger M.L., Lehner B., Cockburn C., Lamouroux N., Pella H., Snelder T., Detry T., 2021. Global prevalence of non-perennial rivers and streams. *Nature*, 594 (7863), 391-397.
- Météo-France, 2022. Changement climatique : l'été 2022 et ses extrêmes météorologiques pourraient être la norme après 2050, <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/changement-climatique-lete-2022-et-ses-extrêmes-meteorologiques> (consulté le 02/10/2025).
- Micklin P., 2007. The Aral sea disaster. *Annual Review of Earth Planetary Sciences*, 35, 47-72.
- Milly P.C., Betancourt J., Falkenmark M., Hirsch R.M., Kundzewicz Z.W., Lettenmaier D.P., Stouffer R.J., 2008. Stationarity is dead: Whither water management? *Science*, 319 (5863), 573-574.
- Miossec A., 2015. Trente ans après, que retenir de la Loi Littoral ? *Pour*, (3), 11-21.
- Mitsch W.J., Bernal B., Nahlik A.M., Mander Ü, Zhang L., Anderson C.J. *et al.*, 2013. Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology*, 28, 583-597.
- Mitsch W.J., Gosselink J.G., 2015. *Wetlands*, 5<sup>e</sup> édition, Hoboken N.J., États-Unis, John Wiley & Sons, 752 p.
- Montagnini F., 2005. *Environmental Services of Agroforestry Systems*, Binghamton, États-Unis, Food Production Press.
- Montanarella L., Pennock D.J., McKenzie N., Badraoui M., Chude V., Baptista I. *et al.*, 2016. World's soils are under threat. *Soil*, 2 (1), 79-82.

- Montginoul M., Erdlenbruch K., 2009. Les réserves de substitution sont-elles une solution à la pénurie d'eau ? *Ingénieries eau-agriculture-territoires* (59-60), 131-136.
- Montgomery D.R., 2007. Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104 (33), 13268-13272.
- Mora C., 2014. Revisiting the environmental and socioeconomic effects of population growth: a fundamental but fading issue in modern scientific, public, and political circles. *Ecology and Society*, 19 (1).
- Mora C., Spirandelli D., Franklin E.C., Lynham J., Kantar M.B., Miles W. *et al.*, 2018. Broad threat to humanity from cumulative climate hazards intensified by greenhouse gas emissions. *Nature Climate Change*, 8 (12), 1062-1071.
- Morand S., 2016. *La Prochaine Peste : Une histoire globale des maladies infectieuses*, Paris, Fayard.
- Morin S., François H., Réveillet M., Sauquet E., Crochemore L., Branger F. *et al.*, 2023. Simulated hydrological effects of grooming and snowmaking in a ski resort on the local water balance. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27 (23), 4257-4277.
- Moss B., 2008. Water pollution by agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363 (1491), 659-666.
- Motesharrei S., Rivas J., Kalnay E., Asrar G.R., Busalacchi A.J., Cahalan R.F. *et al.*, 2016. Modeling sustainability: population, inequality, consumption, and bidirectional coupling of the Earth and Human Systems. *National Science Review*, 3 (4), 470-494.
- Mougin B., Allier D., Blanchin R., Carn A., Courtois N., Gateau C., Putot E. *et al.*, 2008. SILURES Bretagne (Système d'Information pour la Localisation et l'Utilisation des Ressources en Eau Souterraine), rapport final, année 5, BRGM/RP-56457-FR, 129 p., <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-56457-FR.pdf>.
- Mueller V., Gray C., Kossek K., 2014. Heat stress increases long-term human migration in rural Pakistan. *Nature Climate Change*, 4 (3), 182-185.
- Muradian R., Corbera E., Pascual U., Kosoy N., May P.H., 2010. Reconciling theory and practice: An alternative conceptual framework for understanding payments for environmental services. *Ecological Economics*, 69 (6), 1202-1208.
- Mwangi H.M., Julich S., Patil S.D., McDonald M.A., Feger K.H., 2016. Modelling the impact of agroforestry on hydrology of Mara River Basin in East Africa. *Hydrological Processes*, 30 (18), 3139-3155.
- Nair P.R., Kumar B.M., Nair V.D., 2021. *An Introduction to Agroforestry: Four decades of scientific developments*, Cham, Allemagne, Springer, 666 p.
- Narcy J.B., 2004. *Pour une gestion spatiale de l'eau : comment sortir du tuyau ?* Bruxelles, Belgique, EcoPolis, Peter Lang, 342 p.
- Nathan R., Lowe L., 2012. The hydrologic impacts of farm dams. *Australasian Journal of Water Resources*, 16 (1), 75-83.
- Nature [éditorial], 2017. 'Nature-based solutions' is the latest green jargon that means more than you might think. *Nature*, 541, 133-134.
- Nesshöver C., Assmuth T., Irvine K.N., Rusch G.M., Waylen K.A., Delbaere B. *et al.*, 2017. The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective. *Science of the Total Environment*, 579, 1215-1227.
- Neverre N., Rinaudo J.D., Montginoul M., 2010. La tarification incitative : quel impact sur la demande en eau, l'équilibre budgétaire et l'équité ? *Techniques sciences méthodes*, (12), 37-43.
- Newell R.E., Newell N.E., Zhu Y., Scott C., 1992. Tropospheric rivers? A pilot study. *Geophysical Research Letters*, 19 (24), 2401-2404.
- Newton P., Civita N., Frankel-Goldwater L., Bartel K., Johns C., 2020. What is regenerative agriculture? A review of scholar and practitioner definitions based on processes and outcomes. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 577723.
- Ng G.H.C., McLaughlin D., Entekhabi D., Scanlon B.R., 2010. Probabilistic analysis of the effects of climate change on groundwater recharge. *Water Resources Research*, 46 (7).
- Nilsson C., Reidy C.A., Dynesius M., Revenga C., 2005. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*, 308 (5720), 405-408.
- Noyes P.D., McElwee M.K., Miller H.D., Clark B.W., Van Tiem L.A., Walcott K.C., Levin E.D., 2009. The Toxicology of climate change: Environmental contaminants in a warming world. *Environment International*, 35 (6), 971-986.
- Observatoire de l'environnement en Bretagne, 2018. L'environnement en Bretagne : cartes et chiffres clés 2018, Observatoire de l'environnement en Bretagne, 92 p., <https://bretagne-environnement.fr/notice-documentaire/Environnement-bretagne-cartes-chiffres-cles-2018> (consulté le 02/10/2025).

- Ofori S., Puškáčová A., Růžičková I., Wanner J., 2021. Treated wastewater reuse for irrigation: Pros and cons. *Science of the Total Environment*, 760, 144026.
- Ogden F.L., Crouch T.D., Stallard R.F., Hall J.S., 2013. Effect of land cover and use on dry season river runoff, runoff efficiency, and peak storm runoff in the seasonal tropics of Central Panama. *Water Resources Research*, 49 (12), 8443-8462.
- Opperman J.J., Moyle P.B., Larsen E.W., Florsheim J.L., Manfree A.D., 2017. *Floodplains: Processes and management for ecosystem services*, Berkeley, États-Unis, University of California Press.
- Otero I., Farrell K.N., Pueyo S., Kallis G., Kehoe L., Haberl H., et al., 2020. Biodiversity policy beyond economic growth. *Conservation Letters*, e12713.
- Özdemir M., Ayataç H., Cenan İnce E., 2022. Proposed method for determining the population carrying capacity of cities: The city-mass index. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Urban Design and Planning*, 175 (3), 122-137.
- Ozdogan M., Rodell M., Beaudoin H.K., Toll D.L., 2010. Simulating the effects of irrigation over the United States in a land surface model based on satellite-derived agricultural data. *Journal of Hydrometeorology*, 11 (1), 171-184.
- Palm C., Blanco-Canqui H., DeClerck F., Gater L., Grace P., 2014. Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 187, 87-105.
- Palmer M.A., Bernhardt E.S., Allan J.D., Lake P.S., Alexander G., Brooks S. et al., 2005. Standards for ecologically successful river restoration. *Journal of Applied Ecology*, 42 (2), 208-217.
- Parrique T., 2019. The political economy of degrowth, thèse de doctorat, Université Clermont Auvergne, Clermont-Ferrand, France.
- Parrique T., Barth J., Briens F., Kerschner C., Kraus-Polk A., Kuokkanen A., Spangenberg J.H., 2019. Decoupling debunked: Evidence and arguments against green growth as a sole strategy for sustainability, European Environmental Bureau.
- Patterson L.A., Lutz B., Doyle M.W., 2013. Climate and direct human contributions to changes in mean annual stream-flow in the South Atlantic, U.S.A. *Water Resources Research*, 49 (11), 7278-7291.
- Pauli G.A., 2010. *The Blue Economy: 10 years, 100 innovations, 100 million jobs*, Paradigm publications, 336 p.
- Peter P., 1982. *Canal and River Levées*, Elsevier, 540 p.
- Petts G.E., Gurnell A.M., 2005. Dams and geomorphology: Research progress and future directions. *Geomorphology*, 71 (1-2), 27-47.
- Pielke R.A., Adegoke J., Beltrán-Przekurat A., Hiemstra C.A., Lin J., Nair U.S., Nobis T.E., 2007. An overview of regional land-use and land-cover impacts on rainfall. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 59 (3), 587-601.
- Pielke R.A., Marland G., Betts R.A., Chase T.N., Eastman J.L., Niles J.O., Running S.W., 2002. The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 360 (1797), 1705-1719.
- Piqué G., Batalla R.J., Sabater S., 2016. Hydrological characterization of dammed rivers in the NW Mediterranean region. *Hydrological Processes*, 30 (11), 1691-1707.
- Piquette E., Wintz M., 2009. L'eau : ressource unique et gestion éclatée. *Économie rurale*, 310 (2), 74-91.
- Pittelkow C.M., Liang X., Linquist B.A., Van Groenigen K.J., Lee J., Lundy M.E. et al., 2015. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature*, 517 (7534), 365-368.
- Poff N.L., Zimmerman J.K., 2010. Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows. *Freshwater Biology*, 55 (1), 194-205.
- Polimeni J.M., Polimeni R.I., 2006. Jevons' Paradox and the myth of technological liberation. *Ecological Complexity*, 3 (4), 344-353.
- Ponge J.F., 2000. Biodiversité et biomasse de la faune du sol sous climat tempéré. *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, 86 (8), 129-135.
- Pont E., 2022. *Faut-il arrêter de faire des enfants pour sauver la planète ? Entre question de société et choix personnel*, Paris, Éditions Payot.
- Prancevic J.P., Kirchner J.W., 2019. Topographic controls on the extension and retraction of flowing streams. *Geophysical Research Letters*, 46 (4), 2084-2092.
- Puma M.J., Cook B.I., 2010. Effects of irrigation on global climate during the 20<sup>th</sup> century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115 (D16).

- Qiu J., Turner M.G., 2015. Importance of landscape heterogeneity in sustaining hydrologic ecosystem services in an agricultural watershed. *Ecosphere*, 6 (11), 1-19.
- Raworth K., 2017. *Doughnut Economics: Seven ways to think like a 21<sup>st</sup>-century economist*, White River Junction, Vermont, États-Unis, Chelsea Green Publishing.
- Rebhun M., Engel G., 1988. Reuse of wastewater for industrial cooling systems. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 237-241.
- Reckien D., Eisenack K., Lüdeke M.K., 2011. Land consumption by urban sprawl — A new approach to deduce urban development scenarios from actors' preferences. *Environmental Modeling and Assessment*, 16, 465-477.
- Reckien D., Luedeke M.K., 2014. The social dynamics of suburbanization: Insights from a qualitative model. *Environment and Planning A*, 46 (4), 980-1000.
- Rempe D.M., Dietrich W.E., 2014. A bottom-up control on fresh-bedrock topography under landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111 (18), 6576-6581.
- Reulier R., Delahaye D., Viel V., Preux T., 2015. L'érosion des sols sévit aussi dans le bocage ! *Faune sauvage*, (308), 43.
- Reuveny R., 2007. Climate change-induced migration and violent conflict. *Political Geography*, 26 (6), 656-673.
- Rhodes C.J., 2017. The imperative for regenerative agriculture. *Science Progress*, 100 (1), 80-129.
- Richardson K., Steffen W., Lucht W., Bendtsen J., Cornell S.E., Donges J.F. et al., 2023. Earth beyond six of nine Planetary Boundaries. *Science Advances*, 9 (37), eadh2458.
- Ripple W.J., Wolf C., Newsome T., Barnard P., Moomaw W., Grandcolas P., 2019. World scientists' warning of a climate emergency. *BioScience*, 70, 8-12.
- Ripple W.J., Wolf C., Newsome T.M., Galetti M., Alamgir M., Crist E., Mahmoud M.I., Laurance W.F. et al., 2017. World Scientists' Warning to Humanity: A Second Notice. *Bioscience*, 67 (12), 1026-1028.
- Roberts D.A., Johnston E.L., Knott N.A., 2010. Impacts of desalination plant discharges on the marine environment: A critical review of published studies. *Water Research*, 44 (18), 5117-5128.
- Roche L., 1951. Les aspects essentiels du remembrement rural en France. *Économie rurale*, 3 (4), 157-166.
- Rockström J., Mazzucato M., Andersen L.S., Fahrländer S.F., Gerten D., 2023. Why we need a new economics of water as a common good. *Nature*, 615 (7954), 794-797.
- Rockström J., Steffen W., Noone K., Persson Å., Chapin F.S., Lambin E.F. et al., 2009. A safe operating space for humanity. *Nature*, 461 (7 263), 472-475.
- Rodrigo Comino J., Iserloh T., Morvan X., Malam Issa O., Naisse C., Keesstra S.D. et al., 2016. Soil erosion processes in European vineyards: a qualitative comparison of rainfall simulation measurements in Germany, Spain and France. *Hydrology*, 3 (1), 6.
- Rodrigues C.M., Moreira M., Guimarães R.C., Potes M., 2020. Reservoir evaporation in a Mediterranean climate: comparing direct methods in Alqueva Reservoir, Portugal. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24 (12), 5973-5984.
- Roni P., Hanson K., Beechie T., 2008. Global review of the physical and biological effectiveness of stream habitat rehabilitation techniques. *North American Journal of Fisheries Management*, 28 (3), 856-890.
- Rouquet S., 2012. Étude du fonctionnement hydrogéologique et modélisation de l'hydrosystème de Volvic : Prise en compte du rôle joué par la forêt, thèse de doctorat, École nationale supérieure des Mines de Paris.
- Ruf T., 2012. Le projet Aqua Domitia : intérêt et limites. *Pour* (1), 65-74.
- Ruf T., 2015. Transférer l'eau du Rhône dans le Languedoc : regard critique sur les incidences du projet Aqua Domitia et les contradictions territoriales. *Territoire en mouvement — Revue de géographie et aménagement* (25-26).
- SAGE Blavet, 2014. Schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) Blavet, Plan d'aménagement et de gestion durable (PAGD).
- Saleh L., al Zaabi M., Mezher T., 2019. Estimating the social carbon costs from power and desalination productions in UAE. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109284.
- Salles D., 2006. *Les Défis de l'environnement : Démocratie et efficacité*, Paris, Éditions Syllepse, 250 p.
- Salles D., 2022. Repenser l'eau à l'ère du changement climatique. *Annales des Mines — Responsabilité et Environnement* (n° 2, p. 32-36), Cairn/Softwin.
- Sandström K., 1995. Modeling the effects of rainfall variability on groundwater recharge in semi-arid Tanzania. *Hydrology Research*, 26 (4-5), 313-330.



- Santucci Jr V.J., Gephard S.R., Pescitelli S.M., 2005. Effects of multiple low-head dams on fish, macroinvertebrates, habitat, and water quality in the Fox River, Illinois. *North American Journal of Fisheries Management*, 25 (3), 975-992.
- Sauquet É., Évin G., Arnaud P., Berel M., Bernus S., Bonneau J., Branger F., Caballero Y. *et al.*, 2025. Va-t-on réellement manquer d'eau ? in : Bouarfa S., Montginoul M., Pelte T., Sauquet É. (coord.), *Comment partager l'eau en France ? À l'ère de l'anthropocène*, Versailles, éditions Quæ, 11-29.
- Scanlon B.R., Jolly I., Sophocleous M., Zhang L., 2007. Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality. *Water Resources Research*, 43 (3).
- Schäffer B., Stauber M., Müller R., Schulin R., 2007. Changes in the macro-pore structure of restored soil caused by compaction beneath heavy agricultural machinery: a morphometric study. *European Journal of Soil Science*, 58 (5), 1062-1073.
- Schaffner M., Rollot M., Guerroué F., 2021. *Les Veines de la terre : une anthologie des bassins-versants*, Marseille, Wildproject, Petite bibliothèque d'écologie, 160 p.
- Schewe J., Heinke J., Gerten D., Haddeland I., Arnell N.W., Clark D.B., Gosling S.N., 2014. Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111 (9), 3245-3250.
- Schilling K.E., Jha M.K., Zhang Y.K., Gassman P.W., Wolter C.F., 2008. Impact of land use and land cover change on the water balance of a large agricultural watershed: Historical effects and future directions. *Water Resources Research*, 44 (7).
- Schlesinger W.H., Jasechko S., 2014. Transpiration in the global water cycle. *Agricultural and Forest Meteorology*, 189, 115-117.
- Schmitt J., 2013. Construction d'un modèle visant à optimiser la gestion des voies d'eau de la Direction territoriale VNF de Strasbourg, mémoire de fin d'étude, spécialité « Gestion durable de l'eau dans les territoires », ENGEEES <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01653194v1/document>.
- Schmutz S., Sendzimir J., 2018. *Riverine Ecosystem Management: Science for governing towards a sustainable future*, Cham, Allemagne, Springer Nature, 571 p.
- Schneider U., Finger P., Meyer-Christoffer A., Rustemeier E., Ziese M., Becker A., 2017. Evaluating the hydrological cycle over land using the newly-corrected precipitation climatology from the Global Precipitation Climatology Centre (GPCC). *Atmosphere*, 8 (3), 52.
- Schöngart S., Nicholls Z., Hoffmann R., Pelz S., Schleussner C.F., 2025. High-income groups disproportionately contribute to climate extremes worldwide. *Nature Climate Change*, 1-7.
- Schreefel L., Schulte R.P., De Boer I.J.M., Schrijver A.P., Van Zanten H.H.E., 2020. Regenerative agriculture-the soil is the base. *Global Food Security*, 26, 100404.
- Schwarzer S., 2021. Travailler avec les plantes, les sols et l'eau pour refroidir le climat et réhydrater les paysages de la Terre, UNEP, note prospective 25.
- Schyns J.F., Hoekstra A.Y., Booij M.J., Hogeboom R.J., Mekonnen M.M., 2019. Limits to the world's green water resources for food, feed, fiber, timber, and bioenergy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116 (11), 4893-4898.
- Scrieciú S., Stringer L.C., 2008. The transformation of post-communist societies in Central and Eastern Europe and the Former Soviet Union: an economic and ecological sustainability perspective. *European Environment*, 18 (3), 168-185.
- SDES, 2023. L'eau en France : ressource et utilisation, synthèse des connaissances en 2023, <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/leau-en-france-ressource-et-utilisation-synthese-des-connaissances-en-2023> (consulté le 02/10/2025).
- Seddon N., Chausson A., Berry P., Girardin C.A., Smith A., Turner B., 2020. Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375 (1794), 20190120.
- Seddon N., Smith A., Smith P., Key I., Chausson A., Girardin C. *et al.*, 2021. Getting the message right on nature-based solutions to climate change. *Global Change Biology*, 27 (8), 1518-1546.
- Shabad T., 1979. Communist environmentalism. *Problems of Communism*, 28, 64.
- Shahzad M.W., Burhan M., Ang L., Ng K.C., 2017. Energy-water-environment nexus underpinning future desalination sustainability. *Desalination*, 413, 52-64.
- Shatat M., Riffat S.B., 2014. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 9 (1), 1-19.
- Shove E., 2010. Beyond the ABC: climate change policy and theories of social change. *Environment and planning A*, 42 (6), 1273-1285.



- Simon A., 1989. A model of channel response in disturbed alluvial channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, 14 (1), 11-26.
- Simon G., 1998. Le Marais Poitevin, rapport final, Paris, ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement.
- Skaggs R.W., Breve M.A., Gilliam J.W., 1994. Hydrologic and water quality impacts of agricultural drainage. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 24 (1), 1-32.
- Slawski T.M., Veraldi F.M., Pescitelli S.M., Pauers M.J., 2008. Effects of tributary spatial position, urbanization, and multiple low-head dams on warmwater fish community structure in a Midwestern stream. *North American Journal of Fisheries Management*, 28 (4), 1020-1035.
- Sloan B.P., Basu N.B., Mantilla R., 2016. Hydrologic impacts of subsurface drainage at the field scale: Climate, landscape and anthropogenic controls. *Agricultural Water Management*, 165, 1-10.
- Sloan B.P., Mantilla R., Fonley M., Basu N.B., 2017. Hydrologic impacts of subsurface drainage from the field to watershed scale. *Hydrological Processes*, 31 (17), 3017-3028.
- Smil V., 2008. Long-range energy forecasts are no more than fairy tales. *Nature*, 453, 154.
- Smith V.H., Tilman G.D., Nekola J.C., 1999. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, 100 (1-3), 179-196.
- Soane B.D., Ball B.C., Arvidsson J., Basch G., Moreno F., Roger-Estrade J., 2012. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil and Tillage Research*, 118, 66-87.
- Sonter L.J., Dade M.C., Watson J.E., Valenta R.K., 2020. Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity. *Nature Communications*, 11 (1), 4174.
- Sophocleous M., 2002. Interactions between groundwater and surface water: The state of the science. *Hydrogeology Journal*, 10 (1), 52-67.
- Sorrell S., 2009. Jevons' Paradox revisited: The evidence for backfire from improved energy efficiency. *Energy Policy*, 37 (4), 1456-1469.
- Soubeyroux J.-M., Bernus S., Dubuisson B., Drouin A., Madec T., Rousset F., Samacoïts R., Schneider M., Tardy M., Tocquer F., Corre L., Morin S., Ribes A., Somot S., 2025. À quel climat s'adapter en France selon la TRACC ? Partie 2 — Variabilité, extrêmes et impacts climatiques, Météo France, <https://hal.science/hal-04991790>.
- Soubeyroux J.-M., Dubuisson B., Bernus S., Samacoïts R., Rousset F., Schneider M., Drouin A., Madec T., Tardy M., Corre L., 2024. À quel climat s'adapter en France selon la TRACC ? Partie 1 — Concepts et données de base pour les températures et précipitations, Météo France, <https://hal.science/hal-04797481>.
- Souza J.V., Saad J.C., Sánchez-Román R.M., Rodríguez-Sinobas L., 2016. No-till and direct seeding agriculture in irrigated bean: Effect of incorporating crop residues on soil water availability and retention, and yield. *Agricultural Water Management*, 170, 158-166.
- Spandre P., François H., George-Marcelpoil E., Morin S., 2016. Panel based assessment of snow management operations in French ski resorts. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 16, 24-36.
- Spandre P., François H., Thibert E., Morin S., George-Marcelpoil E., 2017. Determination of snowmaking efficiency on a ski slope from observations and modelling of snowmaking events and seasonal snow accumulation. *The Cryosphere*, 11, 891-909.
- Speckhahn S., Isgren E., 2019. The irresistible solution: rationale and risks of extending water limits through desalination in the case of Gotland, Sweden. *Journal of Political Ecology*, 26 (1), 128-149.
- Spracklen D.V., Garcia-Carreras L., 2015. The impact of Amazonian deforestation on Amazon basin rainfall. *Geophysical Research Letters*, 42 (21), 9546-9552.
- Stahel W.R., 2016. The circular economy. *Nature*, 531 (7595), 435-438.
- Stanley E.H., Doyle M.W., 2003. Trading off: the ecological effects of dam removal. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1 (1), 15-22.
- Stefanidis K., Latsiou A., Kouvarda T., Lampou A., Kalaitzakis N., Gritzalis K., Dimitriou E., 2020. Disentangling the main components of hydromorphological modifications at reach scale in rivers of Greece. *Hydrology*, 7 (2), 22.
- Steffen W., Richardson K., Rockström J., Cornell S.E., Fetzer I., Bennett E.M., et al., 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347 (6 223), 1259855.
- Steiger R., Scott D., Abegg B., Pons M., Aall C., 2019. A critical review of climate change risk for ski tourism. *Current Issues in Tourism*, 22 (11), 1343-1379.

- Stone L.R., Schlegel A.J., 2010. Tillage and crop rotation phase effects on soil physical properties in the west-central Great Plains. *Agronomy Journal*, 102 (2), 483-491.
- Strudley M.W., Green T.R., Ascough II J.C., 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil and Tillage Research*, 99 (1), 4-48.
- Susca T., Gaffin S.R., Dell'Oso G.R., 2011. Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs. *Environmental Pollution*, 159 (8-9), 2119-2126.
- Swank W.T., Swift J.L., Douglass J.E., 1988. Streamflow changes associated with forest cutting, species conversions, and natural disturbances. *Forest Hydrology and Ecology at Coweeta*, 297-312.
- Taylor R., Tindimugaya C., 2012. The impacts of climate change and rapid development on weathered crystalline rock aquifer systems in the humid tropics of sub-Saharan Africa: Evidence from south-western Uganda, in Martin-Bordes H.J.L., Gurdak J.J. (éd.), *Climate Change Effects on Groundwater Resources: A Global Synthesis of Findings and Recommendations*, Taylor and Francis publishing, CRC Press, 17-32.
- Taylor R.G., Scanlon B., Döll P., Rodell M., Van Beek R., Wada Y. et al., 2013. Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, 3 (4), 322-329.
- The Shift Project, 2022. Climat, crises ; comment transformer nos territoires, première édition, 216 p., [https://theshiftproject.org/app/uploads/2025/02/TSP\\_SRT\\_Cahiers\\_brochure\\_20221010.pdf](https://theshiftproject.org/app/uploads/2025/02/TSP_SRT_Cahiers_brochure_20221010.pdf).
- The Shift Project, 2024. Pour une agriculture bas carbone, résiliente et prospère, première édition, 251 p., <https://theshiftproject.org/app/uploads/2025/01/RF-Agri-Rapport-Complet-DEF.pdf>.
- Theys J., 2003. La Gouvernance, entre innovation et impuissance. Le Cas de l'environnement. *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie* (dossier 2).
- Thierfelder C., Cheesman S., Rusinamhodzi L., 2013. Benefits and challenges of crop rotations in maize-based conservation agriculture (CA) cropping systems of southern Africa. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 11 (2), 108-124.
- Tockner K., Pusch M., Borchardt D., Lorang M.S., 2010. Multiple stressors in coupled river-floodplain ecosystems. *Freshwater Biology*, 55, 135-151.
- Torralba M., Fagerholm N., Burgess P.J., Moreno G., Plieninger T., 2016. Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 230, 150-161.
- Toze S., 2006. Reuse of effluent water — benefits and risks. *Agricultural Water Management*, 80 (1-3), 147-159.
- Treidel H., Martin-Bordes J.J., Gurdak J.J., 2012. *Climate Change Effects on Groundwater Resources: A Global Synthesis of Findings and Recommendations*, International Association of Hydrogeologists (IAH) - International Contributions to Hydrogeology, Taylor and Francis publishing, CRC Press, 414 p.
- Tuinenburg O.A., Theeuwes J.J., Staal A., 2020. High-resolution global atmospheric moisture connections from evaporation to precipitation. *Earth System Science Data*, 12 (4), 3177-3188.
- Turner B.L., Skole B., Sanderson S., Fischer G., Fresco L., Leemans R., 1995. Land-Use and Land-Cover Change: Science Research Plan. *IGBP Report*, 35, Stockholm, Suède, IGBP.
- Turner G.M., 2008. A comparison of the limits to growth with 30 years of reality. *Global Environmental Change*, 18 (3), 397-411.
- Turner M.G., Gardner R.H., 2015. *Landscape Ecology in Theory and Practice, Pattern and Process*, 2<sup>e</sup> édition, New York, États-Unis, Springer-Verlag.
- US Congress, 1973. Energy reorganization Act of 1973: hearings before a subcommittee of the committee on government operations, Washington D.C., États-Unis, Government Printing Office, p. 248. <https://www.govinfo.gov/app/details/CHRG-93hrg251080/summary> (consulté le 02/10/2025).
- Udawatta R.P., Gantzer C.J., Jose S., 2017. Agroforestry practices and soil ecosystem services, in : Al-Kaisi M.M., Lowery B. (éd.), *Soil Health and Intensification of Agroecosystems*, Cambridge, États-Unis, Academic Press, 305-333.
- Uereyen S., Kuenzer C., 2019. A review of earth observation-based analyses for major river basins. *Remote Sensing*, 11 (24), 2951.
- UICN. Comité français, 2019. Les Solutions fondées sur la Nature pour les risques liés à l'eau en France. Paris, France.
- UNEP-DHI, UNEP, 2016. Transboundary River Basins: Status and Trends. United Nations Environment Programme (U.N.E.P.), Nairobi. [https://unepdhi.org/wp-content/uploads/sites/2/2020/05/GEF\\_TWAPRB\\_FullTechnicalReport\\_compressed.pdf](https://unepdhi.org/wp-content/uploads/sites/2/2020/05/GEF_TWAPRB_FullTechnicalReport_compressed.pdf) (consulté le 02/10/2025).

- United Nations, 2019. World Population Prospects 2019: Highlights (ST/ESA/SER.A/423), Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
- United Nations, 2024. World Population Prospects 2024: Summary of Results, United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, UN.DESA/POP/2024.
- USGCRP, 2018. Impacts, risks, and adaptation in the United States: Fourth National Climate Assessment, Volume II: Report-in-Brief (Reidmiller D.R., Avery C.W., Easterling D.R. *et al.* [éd.]), US Global Change Research Program, Washington, D.C., États-Unis.
- Vadén T., Lähde V., Majava A., Järvensivu P., Toivanen T., Hakala E., Eronen J.T., 2020. Decoupling for ecological sustainability: A categorisation and review of research literature. *Environmental Science & Policy*, 112, 236-244.
- Van Loon A.F., 2015. Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2 (4), 359-392.
- Van Oost K., Govers G., De Alba S., Quine T.A., 2006. Tillage erosion: a review of controlling factors and implications for soil quality. *Progress in Physical Geography*, 30 (4), 443-466.
- Van Tilbeurgh V., 2014. Négocier la nature, les dispositifs environnementaux comme situations dialogiques de négociation, habilitation à diriger des recherches, Université Rennes 2, Rennes.
- Vandecasteele I., Bianchi A., Batista e Silva F., Lavalle C., Batelaan O., 2014. Mapping current and future European public water withdrawals and consumption. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18 (2), 407-416.
- Vanham D., Mekonnen M.M., Hoekstra A.Y., 2013. The water footprint of the EU for different diets. *Ecological Indicators*, 32, 1-8.
- Vanwallegem T., Laguna A., Giráldez J.V., Jiménez-Hornero F.J., 2010. Applying a simple methodology to assess historical soil erosion in olive orchards. *Geomorphology*, 114 (3), 294-302.
- Vanzo D., Bejarano M.D., Boavida I., Carolli M., Venus T.E., Casas-Mulet R., 2023. Innovations in hydropeaking research. *River Research & Applications*, 39 (3).
- Velupuri N.M., Senay G.B., 2017. Partitioning evapotranspiration into green and blue water sources in the conterminous United States. *Scientific Reports*, 7 (1), 6191.
- Venencio M.D.V., García N.O., 2011. Interannual variability and predictability of water table levels at Santa Fe Province (Argentina) within the climatic change context. *Journal of Hydrology*, 409 (1-2), 62-70.
- Verhulst N., Govaerts B., Verachtert E., Castellanos-Navarrete A., Mezzalama M., Wall P.C. *et al.*, 2010. Conservation agriculture, improving soil quality for sustainable production systems. *Advances in soil science: food security and soil quality*, 1799267585, 137-208.
- Verhulst P.-F., 1838. Notice sur la loi que la population poursuit dans son accroissement. *Correspondance mathématique et physique*, 10, 113-121.
- Verhulst P.-F., 1845. Recherches mathématiques sur la loi d'accroissement de la population. *Mémoires de l'Académie royale des sciences et belles-lettres de Bruxelles*, 18, Art. 1, 1-45.
- Vericat D., Batalla R.J., García C., 2006. Breakup and reestablishment of the armour layer in a large gravel-bed river below dams: The lower Ebro. *Geomorphology*, 76 (1-2), 122-136.
- Vertès F., Jeuffroy M.H., Louarn G., Voisin A.S., Justes E., 2015. Légumineuses et prairies temporaires : des fournitures d'azote pour les rotations. *Fourrages*, 223, 221-232.
- Vervoort R.W., Dabney S.M., Römkens M.J.M., 2001. Tillage and row position effects on water and solute infiltration characteristics. *Soil Science Society of America Journal*, 65 (4), 1227-1234.
- Vidal O., 2017. *Mineral Resources and Energy: Future stakes in energy transition*. iSTE Publishing Knowledge, Elsevier.
- Vidal O., 2020. Impact de différents scénarios énergétiques sur les matières premières et leur disponibilité future. *Annales des Mines : Responsabilité et environnement*, 99 (3), 19-23.
- Villablanca L., Batalla R.J., Piqué G., Iroumé A., 2022. Hydrological effects of large dams in Chilean rivers. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 41, 101060.
- Vincent-Caboud L., 2020. Semis direct sous couvert végétal sans herbicide : conception, expérimentation et évaluation conjointes d'itinéraires techniques entre praticiens et chercheurs, thèse de doctorat, AgroParisTech.
- Viollot P.L., Chabard J.P., Esposito P., 2003. *Mécanique des fluides appliquée : écoulements incompressibles dans les circuits, canaux et rivières, autour des structures et dans l'environnement*, Paris, Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, 360 p.
- Visser S., Keesstra S., Maas G., De Cleen M., Molenaar C., 2019. Soil as a basis to create enabling conditions for transitions towards sustainable land management as a key to achieve the SDGs by 2030. *Sustainability*, 11 (23), 6792.

- Wada Y., 2016. Modeling groundwater depletion at regional and global scales: Present state and future prospects. *Surveys in Geophysics*, 37 (2), 419-451.
- Wada Y., Van Beek L.P., Wanders N., Bierkens M.F., 2013. Human water consumption intensifies hydrological drought worldwide. *Environmental Research Letters*, 8 (3), 034036.
- Wada Y., Wisser D., Bierkens M.F., 2014. Global modeling of withdrawal, allocation and consumptive use of surface water and groundwater resources. *Earth System Dynamics Discussions*, 5 (1), 15-40.
- Wada Y., Wisser D., Eisner S., Flörke M., Gerten D., Haddeland I., Tessler Z., 2013. Multimodel projections and uncertainties of irrigation water demand under climate change. *Geophysical Research Letters*, 40 (17), 4626-4632.
- Wagener T., Sivapalan M., Troch P.A., McGlynn B.L., Harman C.J., Gupta H.V. *et al.*, 2010. The future of hydrology: An evolving science for a changing world. *Water Resources Research*, 46 (5).
- Wan N.F., Dainese M., Wang Y.Q., Loreau M., 2024. Cascading social-ecological benefits of biodiversity for agriculture. *Current Biology*, 34 (12), R587-R603.
- Wang L., Ding X., Wu X., 2013. Blue and grey water footprint of textile industry in China. *Water Science and Technology*, 68 (11), 2485-2491.
- Wang-Erlandsson L., Fetzer I., Keys P.W., Van Der Ent R.J., Savenije H.H., Gordon L.J., 2018. Remote land use impacts on river flows through atmospheric teleconnections. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22 (8), 4311-4328.
- Wang-Erlandsson L., Tobian A., van der Ent R.J., Fetzer I., te Wierik S., Porkka M. *et al.*, 2022. A planetary boundary for green water. *Nature Reviews Earth and Environment*, 3 (6), 380-392.
- Warburton M.L., Schulze R.E., Jewitt G.P., 2012. Hydrological impacts of land use change in three diverse South African catchments. *Journal of Hydrology*, 414, 118-135.
- Washington H., 2018. *A Sense of Wonder Towards Nature: Healing the Planet Through Belonging*, Londres, Royaume-Uni, Routledge, 236 p.
- Washington H., Taylor B., Kopnina H., Cryer P., Piccolo J.J., 2017. Why ecocentrism is the key pathway to sustainability. *Ecological Citizen*, 1, Y-Z.
- Wemple B., Shanley J., Denner J., Ross D., Mills K., 2007. Hydrology and water quality in two mountain basins of the northeastern US: assessing baseline conditions and effects of ski area development. *Hydrological Processes: An International Journal*, 21 (12), 1639-1650.
- Werner A.D., Bakker M., Post V.E., Vandenbohede A., Lu C., Ataie-Ashtiani B., Barry D.A., 2013. Seawater intrusion processes, investigation and management: recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources*, 51, 3-26.
- Westman W.E., 1977. How much are Nature's services worth? Measuring the social benefits of ecosystem functioning is both controversial and illuminating. *Science*, 197 (4307), 960-964.
- Wezel A., Bellon S., Doré T., Francis C., Vallod D., David C., 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 503-515.
- Wheeler T., Von Braun J., 2013. Climate change impacts on global food security. *Science*, 341 (6145), 508-513.
- White C., 2020. *Why regenerative agriculture?* *American Journal of Economics and Sociology*, 79 (3), 799-812.
- White P.S., 1979. Pattern, process, and natural disturbance in vegetation. *The Botanical Review*, 45 (3), 229-299.
- Whitehead P.G., Robinson M., 1993. Experimental basin studies — an international and historical perspective of forest impacts. *Journal of Hydrology*, 145 (3-4), 217-230.
- Wicherek S., 2001. The Impact of agriculture on the environment of the Northern Parisian Basin, in : Ryszkowski L., *Landscape Ecology in Agroecosystems Management*, Boca Raton, CRC Press, p. 263-276.
- Wiederkehr E., Dufour S., Piégay H., 2008. Suivi physique et biologique des rivières en tresses, rapport final, zone atelier Bassin du Rhône, 45 p.
- Wiedmann T., Lenzen M., Keyßer L.T., Steinberger J.K., 2020. Scientists' warning on affluence. *Nature Communications*, 11 (1), 1-10.
- Wilhite D.A., Glantz M.H., 1985. Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water international*, 10 (3), 111-120.
- Williams G.P., Wolman M.G., 1984. Downstream effects of dams on alluvial rivers, US Geological Survey, Professional paper 1286.

- Wolf S., Esser V., Schütttrumpf H., Lehmkuhl F., 2021. Influence of 200 years of water resource management on a typical central European river. Does industrialization straighten a river? *Environmental Sciences Europe*, 33, 1-23.
- Wright J.P., Jones C.G., 2006. The concept of organisms as ecosystem engineers ten years on: progress, limitations, and challenges. *BioScience*, 56 (3), 203-209.
- Wu J., Chen X., Yao H., Gao L., Chen Y., Liu M., 2017. Non-linear relationship of hydrological drought responding to meteorological drought and impact of a large reservoir. *Journal of Hydrology*, 551, 495-507.
- WWAP, 2019. The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind. Paris, UNESCO. World Water Assessment Programme.
- WWF, 2020. *The Loss of Nature and the Rise of Pandemics: Protecting human and planetary health*, Gland, Suisse, WWF.
- Xu C., Kohler T.A., Lenton T.M., Svenning J.C., Scheffer M., 2020. Future of the human climate niche. *Proceedings of the National Academy of Sciences*.
- Yang S.L., Milliman J.D., Li P., Xu K., 2011. 50,000 dams later: erosion of the Yangtze River and its delta. *Global and Planetary Change*, 75 (1-2), 14-20.
- Yang X., Chen Y., Pacenka S., Gao W., Ma L., Wang G. *et al.*, 2015. Effect of diversified crop rotations on groundwater levels and crop water productivity in the North China Plain. *Journal of Hydrology*, 522, 428-438.
- Yeomans P.A., 1954. *The Keyline plan*. Waite & Bull, Sydney, Australia.
- Yeomans P.A., 1958. *The Challenge of Landscape: The Development and Practices of Keyline*, Sydney, Australie, Keyline.
- Yeomans P.A., 1978. *Water for Every Farm Using the Keyline Plan*, Ultimo, Australia Murray Books.
- Yi L., Jiao W., Chen X., Chen W., 2011. An overview of reclaimed water reuse in China. *Journal of Environmental Sciences*, 23 (10), 1585-1593.
- Young A., 1989. *Agroforestry for Soil Conservation*, CAB International.
- Zaka S., 2025. *Orages sur le climat — L'agroclimatologie ouvre un espoir pour notre avenir sur terre*, Harpercollins, Enquêtes et documents, 240 p.
- Zedler J.B., Kercher S., 2005. Wetland resources: status, trends, ecosystem services, and restorability. *Annual Review of Environment and Resources*, 30 (1), 39-74.
- Zevenbergen C., Fu D., Pathirana A., 2018. Transitioning to sponge cities: Challenges and opportunities to address urban water problems in China. *Water*, 10 (9), 1230.
- Zhang H., Xu Y., Kanyerer T., 2020. A review of the managed aquifer recharge: Historical development, current situation and perspectives. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 118, 102887.
- Zheng Y., Ross A., Villholth K.G., Dillon P., 2021. Managing aquifer recharge: a showcase for resilience and sustainability, UNESCO, Paris.
- Zolghadr-Asli B., McIntyre N., Djordjevic S., Farmani R., Pagliero L., Martínez-Alvarez V., Maestre-Valero J.F., 2023. A review of limitations and potentials of desalination as a sustainable source of water. *Environmental Science and Pollution Research*, 30 (56), 118161-118174.

# Crédits iconographiques

Dessin de couverture : © Water Family.

Illustrations de Water Family : © Giulia Buonarrivo et Gorka Oyarzun.


Figure 1.4 : licence ouverte 2.0 (licence etalab-2.0).

Figure 2.1 : Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International.

Figure 2.5 : <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>.

Figure 3.2 : <https://pubs.usgs.gov/publication/gip221>.

Figure 3.4 : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/leau-en-france-ressource-et-utilisation-synthese-des-connaissances-en-2023>.

Responsable éditoriale : Véronique Vêto  
Coordination éditoriale : Anne-Lise Prodel  
Édition : Mickaël Legrand  
Assistante d'édition : Farah Dekiouk  
Mise en page :  **EliLoCom**  
Couverture : Hélène Bonnet  
Impression : ISlprint (France)  
Achévé d'imprimer en octobre 2025  
Numéro d'impression :  
Dépôt légal : novembre 2025





Alors que la gestion de l'eau occupe une place croissante dans les débats publics, cet ouvrage propose de recentrer les enjeux hydriques et environnementaux à l'échelle locale, en France continentale.

S'appuyant sur une synthèse de connaissances, il invite à adopter une vision à la fois territorialisée et transversale, en mobilisant les aspects biophysiques et sociaux associés à l'eau, c'est-à-dire le fonctionnement naturel du cycle de l'eau (stocks, flux...), les impacts des activités humaines et leurs causes incluant les questions de gouvernance, de réglementation, de mode de vie... L'ouvrage aborde notamment la question des prélèvements et des usages de l'eau, des modifications de la couverture des sols, de l'aménagement des cours d'eau et du changement climatique. Un certain nombre de leviers d'actions permettant de renforcer la résilience des territoires face aux crises actuelles et à venir sont également proposés (solutions sociales, fondées sur la nature ou techniques).

Destiné aux décideurs et gestionnaires de l'eau, et plus généralement à toute personne souhaitant mieux comprendre les enjeux quantitatifs de l'eau à l'échelle de son territoire, ce livre offre également un appui théorique et pratique au déploiement de l'outil de médiation scientifique « *Trajectoire eau et territoire* », conçu pour favoriser le dialogue entre usagers et le partage de connaissances locales sur l'eau.

**Elias Ganivet** est docteur en sciences de l'environnement et actuellement postdoctorant au CNRS (UMR Géosciences Rennes et UMR ESO). À l'interface entre sciences naturelles et sciences sociales, ses travaux portent sur l'accompagnement des territoires autour d'approches transversales, prospectives et participatives de gestion locale de l'eau.



éditions  
**Quæ**

Éditions Cirad, Ifremer, INRAE  
[www.quae.com](http://www.quae.com)

26 €

ISBN : 978-2-7592-4156-9



ISSN : 2115-1229  
Réf. : 03022