

Ralentir et conserver l'eau dans les têtes de bassin versant : enjeux, solutions et évaluation des effets hydrologiques

Un état de la connaissance et des enjeux de connaissance des mesures visant à ralentir et conserver l'eau dans des petits bassins versants ruraux, dans une perspective d'atténuation des aléas hydrométéorologiques et de résilience aux changements climatiques



Synthèse écrite par Zoé Reverdy (ENS de Lyon),
dans le cadre d'un stage de recherche encadré par Sabine Girard (LESSEM, INRAE) et Nadia Carluer (Riverly, INRAE),
avec la participation de Samuel Pinjon (Université Lyon 3)

Version définitive du 02 juin 2025

Le contenu de ce document, à l'exception des illustrations non assignées à l'autrice, est disponible sous licence CC BY 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Résumé

Les petits bassins versants ruraux sont confrontés à des aléas hydrométéorologiques et des déséquilibres hydriques, se traduisant par l'érosion des sols, une moindre disponibilité de l'eau pour les écosystèmes aquatiques et terrestres, un stress hydrique affectant les forêts, jusque des inondations par ruissellement et des sécheresses agricoles et hydrologiques. Le changement climatique accentue la fréquence et l'intensité de ces phénomènes. Dans ce contexte, de nombreuses initiatives émergent pour restaurer la capacité des sols et des paysages à ralentir et retenir l'eau. Ces approches, qualifiées de Solutions fondées sur la Nature (SfN), de Mesures Naturelles de Rétention d'Eau (MNRE), ou encore d'« hydrologie régénérative », visent à renforcer la résilience des agro- et écosystèmes. Elles mobilisent des savoirs et techniques issus de l'agroécologie, de l'agriculture de conservation, du génie écologique ou végétal, du *rainwater harvesting*, etc.

Cette synthèse, issue d'un stage de cinq mois, dresse un état des lieux des connaissances sur l'évaluation des effets hydrologiques de ces pratiques, de l'échelle de la parcelle à celle du bassin versant. Elle s'appuie sur une analyse bibliographique (publications scientifiques et littérature grise) et sur une douzaine d'entretiens semi-directifs menés auprès d'experts scientifiques et techniques.

Les mesures identifiées visent à ralentir le ruissellement et à favoriser l'infiltration. Elles se répartissent en trois grandes catégories :

1. L'adoption de pratiques agricoles et forestières conservatrices de l'eau et des sols, telles que la réduction du travail du sol, l'installation de couverts végétaux permanents, la diversification des cultures, l'adaptation du drainage et le travail du sol en courbes de niveau ;
2. La restauration ou création de milieux naturels ou semi-naturels comme les prairies, haies, zones humides et forêts ;
3. La conception d'aménagements légers du paysage, tels que des fossés, mini-retenues, dépressions et terrasses.

Les preuves de l'efficacité de ces approches s'appuient à la fois sur des savoirs et observations empiriques et des travaux scientifiques. Les effets localisés sont relativement bien établis, quoique fortement dépendants du contexte climatique, pédologique, etc. local. En revanche, leur potentiel à l'échelle du bassin versant reste un domaine de recherche encore peu exploré, en raison du manque de suivis rigoureux à grande échelle (spatiale et temporelle), de la complexité des interactions hydrologiques, et des limites des approches de modélisation numérique.

Les entretiens mettent en lumière l'intérêt croissant pour ces approches intégratives, mais aussi les risques de simplification ou de surestimation de leurs effets. Les experts soulignent la nécessité de recherches contextualisées, pluridisciplinaires et approfondies, pour consolider les connaissances et développer des outils de transposition adaptés aux différents territoires.

Abstract

Small rural watersheds are increasingly affected by hydrometeorological hazards and water imbalances, leading to soil erosion, reduced water availability for aquatic and terrestrial ecosystems, water stress impacting forests, as well as runoff-induced flooding and both agricultural and hydrological droughts. Climate change is amplifying the frequency and intensity of these events. In this context, numerous initiatives are emerging to restore the capacity of soils and landscapes to slow down and retain water. These approaches—referred to as Nature-based Solutions (NbS), Natural Water Retention Measures (NWRM), or “regenerative hydrology”—aim to strengthen the resilience of agro- and ecosystems. They draw on knowledge and techniques from agroecology, conservation agriculture, ecological and vegetation engineering, rainwater harvesting, and related fields.

This synthesis, the result of a five-month internship, presents a state of the art on the evaluation of hydrological effects of such practices, from the plot scale to that of the watershed. It is based on a literature review (scientific publications and grey literature), complemented by a dozen semi-structured interviews with scientific and technical experts.

The identified measures aim to reduce runoff and enhance infiltration. They fall into three main categories:

1. Adoption of agricultural and forestry practices that conserve water and soil, such as reduced tillage, permanent vegetative cover, crop diversification, adapted drainage systems, and contour farming ;
2. Restoration or creation of natural or semi-natural environments, such as grasslands, hedgerows, wetlands, and forests ;
3. Design of small-scale landscape features, such as ditches, micro-reservoirs, depressions, and terraces.

Evidence of the effectiveness of these approaches is drawn from both empirical knowledge and scientific research. While their localized impacts are relatively well documented, they remain highly dependent on local conditions such as climate and soil characteristics. In contrast, their potential at the watershed scale remains a relatively unexplored research frontier. This is due to a lack of large-scale, long-term monitoring, the complexity of hydrological interactions, and limitations in numerical modelling approaches.

The interviews reveal a growing interest in these integrative approaches, but also caution against overgeneralization or overestimation of their effects. Experts emphasize the need for contextualized, multidisciplinary, and in-depth research to strengthen knowledge and develop reliable tools for adapting and transferring these practices to diverse territorial contexts.

Table des figures et des tableaux

Figure 1 - Schématisation des processus hydrologiques à l'échelle d'une parcelle agricole (source : Alletto and Bustillo, 2023)	12
Figure 2 - Schématisation des processus hydrologiques et écoulements sur un versant (source : illustration issue de la documentation de la plateforme MAELIA)	13
Figure 3 - Schématisation des enjeux identifiés liés à la quantité d'eau sur des bassins versants ruraux, en fonction de l'échelle spatiale et temporelle à laquelle ils se manifestent. A noter : la qualification des enjeux de continu à ponctuel est approximative, d'autant qu'elle peut évoluer avec le changement climatique. Les deux encadrés bicolores concernent autant les milieux agricoles que forestiers (source : autrice).....	14
Figure 4 - Résultats d'une recherche bibliographique basée sur les mots-clés « nature-based solutions » et « water » dans la base Web of Science (recherche effectuée le 23/01/2025, graphique généré par WoS).....	16
Figure 5 - Schéma illustrant le recouvrement partiel des concepts de MNRE et de SFN (issu du guide sur les différences entre MNRE et SFN produit par l'OiEau)	18
Figure 6 - Présentation du "triolet eau-sol-arbre" proposé par les porteurs de l'hydrologie régénérative (source : support de présentation réalisé par © Permalab).....	19
Figure 7- Illustration des effets du travail du sol (labour) dans un champ après de fortes précipitations (illustration issue de WWAP / ONU-Eau, 2018).....	25
Figure 8 - Photographies de checkdams en bois et en pierre installés dans les talwegs, et d'une fascine végétalisée dans un versant (en haut à droite) (source des images : © Permalab)	32
Figure 9 - Photographies d'une baissière remplie d'eau de ruissellement (gauche) et d'autres aménagements réalisés dans des exploitations agricoles accompagnées par le bureau d'étude Permalab (source des images : ©Permalab (gauche) et tirées de Eeckman <i>et al.</i> (2025) (droite))	34
Figure 10 - Schématisation de l'approche de l'hydrologie régénérative sur un petit bassin versant agricole (Source : © Permalab).....	39
Figure 11 - Représentation schématique simplifiée de la modélisation hydrologique d'un bassin versant (source : autrice)	40
Figure 12 - Schématisation du principe théorique d'une expérience sur des bassins jumeaux (figure issue de van Meerveld and Seibert, 2024)	44
Figure 13 – Synthèse illustrée des résultats hydrologiques du projet ModRec Vesdre, (figure issue de la note de synthèse non technique du projet).....	46
Figure 14 – Représentation synthétique de certains résultats du projet Explore 2 portant sur la modélisation de l'hydrologie future de la France métropolitaine. Gauche : Moyenne annuelle des débits journaliers pour 4 narratifs (évolution de -32% à +32% à horizon futur de 2070 à 2099, par rapport à une période de référence de 1976 à 2005) ; Droite : minimum estival de la moyenne sur 10 jours du débit journalier (période de mai à fin novembre) (évolution de -64% à +64% à horizon futur de 2070 à 2099, par rapport à une période de référence de 1976 à 2005).....	50
Tableau 1 - Recensement des effets hydrologiques par mesure, selon les références étudiées (source : autrice).....	22
Tableau 2 - Exemples de facteurs, d'indicateurs et de sources de données possibles (source : autrice)	35
Tableau 3 – Propositions de perspectives de recherche à partir des entretiens menés. La deuxième colonne cite les références et les entretiens ayant abordé l'axe en question, ainsi que des exemples de projets en cours ou envisagés traitant de celui-ci (source : autrice).	47
Tableau 4 - Utilisations du qualificatif "sans regret" par des institutions publiques pour désigner des actions ou mesures d'adaptation au changement climatique ou de gestion quantitative de l'eau (source : autrice, citations tirées de sites internet ou documents institutionnels)	51
Tableau 5 - Tableau de présentation des références principales étudiées pour la rédaction de la synthèse (source : autrice).....	65

Remerciements

Nous remercions vivement toutes les personnes que nous avons sollicitées pour des entretiens et des échanges, notamment Lionel Alletto, Charles Perrin, Aurore Degré, Adrien Selles, Jérôme Molénat, Olivier Hébrard, Benoît Fribourg-Blanc, Judith Eeckman, Simon Ricard, Clément Fabre, Claire Petitjean, Jean-Charles Montaufier, et Charles Antoine. Leurs expertises, leurs retours d'expérience et leurs relectures attentives du document ont grandement contribué à construire et enrichir ce travail.

Nous remercions également le Laboratoire des Écosystèmes et Sociétés en Montagne (LESSEM) pour l'accueil de ce stage, ainsi que le laboratoire Riverly, le réseau Systèmes Agricoles et Eau, et l'équipe du projet GGEMM, qui ont offert l'opportunité de présenter et de discuter les résultats de ce travail lors de séminaires internes.

Table des matières

1.	Introduction.....	6
1.1.	Contexte.....	6
1.2.	Problématisation et cadrage du sujet.....	8
2.	Méthodes.....	9
3.	Etat de la connaissance.....	12
3.1.	Introduction des processus hydrologiques, des enjeux et des notions associées au ralentissement et à la conservation de l'eau dans les versants	12
3.1.1.	Processus hydrologiques	12
3.1.2.	Enjeux liés à la quantité d'eau sur des petits bassins versants ruraux.....	13
3.1.3.	Diversité des notions associées, origines et utilisation	15
	Les Solutions Fondées sur la Nature / Nature-Based Solutions	15
	Les Mesures Naturelles de Rétention d'Eau / Natural Water Retention Measures	17
	L'Hydrologie Régénérative / Regenerative Hydrology	18
3.2.	Les mesures considérées et l'évaluation de leurs effets hydrologiques localisés.....	20
	L'adoption de pratiques agricoles et forestières permettant de conserver l'eau et les sols	24
	La restauration, préservation, et création de milieux naturels ou semi-naturels.....	28
	La conception de petits aménagements pour ralentir et infiltrer l'eau de ruissellement.....	31
	Points d'attention sur la dépendance des effets aux conditions locales et sur le suivi des effets dans la durée.....	35
3.3.	L'évaluation des effets hydrologiques à l'échelle d'un bassin versant.....	37
3.3.1.	Pourquoi évaluer les effets à plus grande échelle ?	37
	Que peut vouloir dire « passer à grande échelle » ?	37
	Quels enjeux sont ciblés à l'échelle d'un bassin versant ?	39
	Quelles preuves existe-t-il de l'efficacité à « grande échelle » ?.....	40
3.3.2.	Comment évaluer les effets à grande échelle ? Les approches de modélisation numérique, leur potentiel et leurs limites.....	40
	Les différents types de modèles numériques	40
	A quoi peuvent servir ces exercices de modélisation ?.....	43
3.4.	Perspectives scientifiques et attentes vis-à-vis de la recherche.....	47

4.	Quelques enjeux de connaissance associés aux approches visant à ralentir et conserver l'eau dans les versants.....	49
4.1.	Ralentir et conserver l'eau dans les versants : des mesures « sans regret » ?	49
4.1.1.	Les projections climatiques et hydrologiques anticipent des impacts importants du changement climatique sur les ressources en eau... ..	49
4.1.2.	...nécessitant l'adaptation des usages et des écosystèmes à des quantités d'eau disponibles plus faibles en été	50
4.2.	Enjeux liés à l'émergence et à la multiplication de nouvelles notions.....	53
4.3.	Rôles des scientifiques et recommandations	55
5.	Limites et perspectives du travail mené	56
6.	Conclusion.....	57
7.	Bibliographie.....	59
8.	Annexes	65
8.1.	Références principales étudiées pour la rédaction de la synthèse	65
8.2.	Mots-clés utilisés lors des recherches bibliographiques.....	67
8.3.	Guide utilisé pour la conduite des entretiens semi-directifs.....	68
8.4.	Extraits de la revue de littérature de Lalonde <i>et al.</i> (2024) : méthode, références étudiées et tableau d'évaluation des effets hydrologiques.....	72
8.5.	Tableau issu de Kumar <i>et al.</i> (2021), synthétisant les avantages et limites des modèles identifiés par les auteurs	74

1. Introduction

1.1. Contexte

Le changement climatique accentue les événements hydrométéorologiques extrêmes et leurs effets (Calvin *et al.*, 2023). Des sécheresses et inondations de plus en plus sévères touchent le sud de la France ainsi que d'autres régions. Sur des zones en forte pente s'y ajoutent des enjeux de ruissellement accru, d'érosion, et de glissement de terrain. Pour répondre à ces enjeux, des aménagements de génie civil, ou dits d'ingénierie « classique » ou « grise » peuvent être mis en œuvre pour la gestion de l'eau pluviale et de l'érosion. Concernant la diminution des ressources en eau, celle-ci touche les écosystèmes et les usages, mettant notamment en tension une partie de la production agricole dépendante de l'irrigation et justifiant le développement du stockage dans des retenues imperméabilisées.

En complément du stockage et du génie civil, ou comme alternative à ceux-ci, certains acteurs et scientifiques insistent sur l'intérêt de ralentir l'eau en optimisant l'aménagement du paysage et en s'appuyant sur les propriétés des milieux naturels (sols, forêts, zones humides, etc.). Ces solutions dites « douces » ou « vertes » répondent également aux conséquences de l'anthropisation des milieux sur les circulations de l'eau. En effet, l'urbanisation, l'artificialisation des sols, les pratiques agricoles intensives associées au drainage, et la monoculture conduisent à un appauvrissement des sols, à une augmentation du ruissellement et de l'érosion, une perte d'infiltration de l'eau dans les sols, et impactent les régimes hydrologiques (Martín-Queller *et al.*, 2010; Oudin *et al.*, 2018; Lucas-Borja *et al.*, 2019).

Concrètement, le ralentissement et la conservation de l'eau dans les têtes de bassins ruraux s'appuieraient sur les fonctions d'écosystèmes particuliers (forêts, prairies, zones humides, haies, etc.) et leur restauration, ainsi que sur des pratiques et des aménagements issus de l'agroécologie, de l'agroforesterie, du génie écologique, ou encore de la correction torrentielle. Les pratiques agricoles consistent en la réduction du travail du sol, l'installation d'un couvert permanent, la diversification des cultures ou encore le drainage contrôlé. Les aménagements peuvent consister en des fossés, des canaux, des micro-barrages en branchages, en bois ou en pierre, des bassins d'infiltration, etc. La disposition de ces éléments du paysage (le long des courbes de niveau notamment) joue un rôle important dans l'optimisation des effets sur les écoulements d'eau.

Restaurer les capacités de rétention d'eau des sols et ralentir les écoulements viendrait donc inverser une tendance d'accélération des flux et augmenter la résilience¹ des sols, des hydrosystèmes et des territoires face aux extrêmes hydrométéorologiques et aux effets des changements climatiques.

Dans le contexte français actuel, on retrouve ces approches parmi les notions de « solutions fondées sur la nature »² (SFN), de « mesures naturelles de rétention d'eau » (MNRE), d'« aménagement d'hydraulique douce », d'« infrastructures vertes » ou « écologiques », d'« ingénierie écologique », ou encore de « mesures éponges ». La diversité de ces appellations illustre l'intérêt porté par des communautés d'acteurs variées (agriculteurs, gestionnaires de l'eau urbaine ou des cours d'eau, scientifiques, etc.) ainsi que le caractère multifonctionnel de ces mesures.

¹ Selon le 6^{ème} rapport d'évaluation du GIEC, la résilience dans le contexte du changement climatique désigne la « capacité des systèmes sociaux, économiques et environnementaux interdépendants à faire face à une évolution, à une perturbation ou à un événement aléatoire, leur permettant d'y répondre ou de se réorganiser de façon à préserver leur fonction, leur identité et leur structure fondamentales » (définition adaptée du Conseil de l'Arctique, 2016)

² Le concept de Solutions fondées sur la Nature (SFN) s'est développé depuis une dizaine d'années, porté par l'UICN (Union Internationale de Conservation de la Nature), pour répondre à différents défis sociétaux, tels que la sécurité de l'approvisionnement en eau (Cohen-Shacham *et al.*, 2016), tout en produisant des bénéfices pour la biodiversité.

Des guides techniques, projets, interventions médiatiques, émergent autour de ces notions, cherchant à structurer et mettre en valeur les différents leviers d'action¹. En particulier, les Agences de l'eau, l'OFB, l'ADEME, l'OiEau, investissent cette thématique et y portent un fort intérêt. Les enjeux de ces guides et projets sont de rendre accessible la connaissance existante, valoriser les bénéfices et l'efficacité de ces mesures, et fournir des outils pour leur mise en œuvre. Ils ciblent en particulier l'adaptation au changement climatique, à travers : la prévention des risques liés à l'eau et d'autres risques naturels, la transition agro-écologique, la résistance et résilience des forêts, mais aussi l'amélioration de la qualité de vie et la préservation de la biodiversité. Ces mesures sont parfois qualifiées de « mesures sans regrets »².

Les acteurs impliqués dans la gestion de l'eau se questionnent sur ce qu'ils peuvent attendre de ce type de solutions, en particulier dans des secteurs dits « en déséquilibre quantitatif » (Allain, Plumecocq and Burger-Leenhardt, 2019 ; Antoine *et al.*, 2023). Dans ces secteurs, les prélèvements dépassent les « volumes prélevables » réglementaires (décrits dans l'article R211-21-1 du Code de l'Environnement³). Ces volumes prélevables sont définis dans le but de respecter, au minimum 8 années sur 10, les débits d'objectif d'étiage (DOE) qui sont nécessaires au bon état écologique des eaux et établis par des évaluations environnementales⁴. Dans l'élaboration des projets de territoires pour la gestion de l'eau (PTGE), l'optimisation de la rétention d'eau dans les sols et de son infiltration est parfois envisagée comme alternative ou complément au stockage d'eau pour l'irrigation⁵. Le fait que ces options soient considérées pour traiter le manque d'eau dans des territoires en tension renforce l'intérêt de mieux connaître leurs impacts hydrologiques cumulés potentiels, ainsi que les conditions de leur déploiement et de leur efficacité, d'autant plus que les conséquences du changement climatique sur la ressource en eau conduisent à anticiper des tensions plus importantes et étendues à d'autres territoires.

Plus récemment, une nouvelle notion, « l'hydrologie régénérative »⁶, a émergé de la société civile. Elle est portée et diffusée par l'association « Pour Une Hydrologie Régénérative » (PUHR) créée en décembre 2022. Cette notion s'inspire de diverses approches et techniques, issues de la permaculture, de l'agriculture de conservation des sols, ou encore de la gestion intégrée de l'eau de pluie. Elle vise selon ses promoteurs à rassembler toutes les mesures permettant de « ralentir, répartir, infiltrer et stocker » les eaux de pluie et de ruissellement, et à les déployer à l'échelle de bassins versants. Elle s'appuie également sur un principe de « densification de la végétation multifonctionnelle », afin de rendre les écosystèmes et agrosystèmes plus résilients face au changement climatique.

La notion « d'hydrologie régénérative » se diffuse rapidement dans les médias⁷, dans la société civile et les institutions depuis 2023. L'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée Corse, dans le cadre de l'appel à manifestation d'intérêt (AMI) « Eau et climat » (2023-2026), accompagne et finance cinq projets portés par des collectivités territoriales pour expérimenter à l'échelle de parcelles, d'exploitations agricoles ou de versants des pratiques relevant de l'hydrologie régénérative. Elle soutient également l'association PUHR pour le suivi et la diffusion des enseignements de ces cas pilotes, ainsi que l'étude de la pertinence de l'élaboration de « Plans Territoriaux de Régénération des Cycles de l'Eau » (PTRCE). Certaines collectivités projettent de tester et mettre en place cette

¹ Quelques exemples : la [boîte à outils](#) de l'OFB dans le cadre du projet Life Artisan, le [livre blanc](#) du collectif aquagir, parmi bien d'autres aux échelles régionales, nationales et internationales.

² cf les exemples cités en partie 4.1.

³ https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000043696974

⁴ <https://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/sobriete-des-usages-et-partage-de-la-ressourceprelevements-en-eau/etudes-devaluation-des-volumes>

⁵ Il en est mention dans le [guide d'élaboration et de mise en œuvre des PTGE](#) publié en août 2023

⁶ Terme proposé par l'association « Pour une hydrologie régénérative » <https://hydrologie-regenerative.fr/>

⁷ <https://www.ouest-france.fr/nature/video-a-la-decouverte-de-l-hydrologie-regenerative-3c60c8ea-d9e8-47ed-8a7b-bcf008af03f3> ; <https://aquagir.fr/gestion-milieux-aquatiques/connaissances/charlene-descollonges-lhydrologie-regenerative-sinscrit-pleinement-dans-les-solutions-fondees-sur-la-nature/> ; <https://terredeliens.org/national/actu/webinaire-comprendre-hydrologie-regenerative-03-10-2024/>

approche à l'échelle de petits bassins versant, comme c'est le cas de Valence Romans Agglo sur le bassin versant du Bost (20 km²). A l'autre bout de la France, le conseil scientifique de l'Agence de l'eau Adour-Garonne fait part d'une position prudente sur l'hydrologie régénérative, dans une note publiée en mars 2024¹.

Si des gestionnaires de l'eau et des territoires, agriculteurs, institutions, etc. s'intéressent à ces approches pour traiter des enjeux liés à la quantité d'eau, ils s'interrogent cependant sur leurs effets, en particulier les effets hydrologiques à l'échelle du bassin versant. Quelques expérimentations ont bien été menées à cette échelle, mais avec peu de suivi et d'évaluation quantifiée de leurs effets. C'est pourquoi ce travail porte sur l'état de la connaissance et des enjeux de connaissance sur l'évaluation des effets hydrologiques des « mesures de ralentissement et de conservation de l'eau dans les têtes de bassins versants » (terme jugé intégratif des différents objets et notions étudiés).

1.2. Problématisation et cadrage du sujet

Plusieurs questions sont traitées dans cet état de l'art :

- Pourquoi chercher à ralentir et conserver l'eau dans les têtes de bassin versant ?
- **Quel est l'état des connaissances des effets hydrologiques des mesures associées au ralentissement et à la conservation de l'eau dans les têtes de bassins versants ruraux, dans un contexte agricole ou forestier ?**
- Notamment, quelle connaissance a-t-on de leurs effets quantitatifs individuels localisés d'une part, et de leurs effets cumulés à l'échelle d'un bassin versant d'autre part ?
- Quels sont les outils numériques permettant d'évaluer leur efficacité, théorique et réelle, dans une perspective de déploiement et de combinaison de ce type de mesures ? Quelles en sont les limites ?
- Enfin, quels enjeux de connaissance peuvent être associés ?

Ce travail vise à fournir un état des connaissances et des enjeux de connaissance : il s'agira notamment d'identifier les éléments établis, les zones d'incertitude, les points de controverses scientifiques, les questions de recherche.

Ce travail est centré sur des milieux semi-naturels, principalement agricoles et forestiers, situés en tête de bassin versant (bassin de superficie de l'ordre de dizaine(s) de km²), à une échelle cohérente d'un point de vue hydrologique. Les mesures déployées en contexte urbain (désimperméabilisation, arbre de pluie, etc.) ne seront pas traitées, car les connectivités des sols et des réseaux (d'eau pluviale notamment) y sont différentes. Le milieu fluvial (plaine inondable) et les SFN associées (restauration écologique et hydromorphologique, reméandrage, restauration ou préservation de la ripisylve, etc.) seront également écartés car associés à des processus, techniques et échelles différentes. Ces deux contextes sont également étudiés par ailleurs. Cet état de l'art, bien que centré sur certaines régions du territoire français métropolitain (le sud-est en particulier), ne se limite pas à ce seul climat.

Pour chaque type de mesure, différentes questions se posent concernant les contextes et échelles d'application :

- Y a-t-il des spécificités climatiques, pédologiques, géologiques conditionnant l'efficacité de cette mesure ?
- Y a-t-il des emplacements optimaux pour cette mesure ?

¹ Cette note rappelle que, bien que l'aménagement du territoire et l'occupation du sol affectent le cycle de l'eau, la connaissance scientifique est en cours de consolidation sur certaines propositions. Elle alerte sur les propositions de végétalisation massive pour « générer des précipitations » s'écartant des preuves scientifiques. <https://eau-grandsudouest.fr/medias/etudes/note-conseil-scientifique-hydrologie-regenerative>

- Y a-t-il des synergies ou des antagonismes selon les enjeux ou les échelles traitées ?
- Par ailleurs, faut-il chercher à multiplier ces mesures à l'échelle du bassin ?
- A combiner des mesures différentes ?
- Comment évaluer alors leur efficacité ?

2. Méthodes

Ce travail est exploratoire dans le sens où il constitue un défrichage d'un sujet encore mal connu. La démarche méthodologique comprend deux étapes :

- un état de l'art bibliographique de la connaissance sur les effets hydrologiques des mesures de ralentissement et de conservation de l'eau, centré sur les têtes de bassin versant ;
- une analyse qualitative des enjeux de cette connaissance, à partir d'entretiens semi-directifs avec un échantillon d'acteurs concernés par sa production et son utilisation.

L'état de l'art bibliographique vise l'exhaustivité du point de vue des objets considérés, des processus en jeu et des effets identifiés, mais il est limité aux enjeux quantitatifs et au contexte des têtes de bassins versants ruraux. Il s'appuie sur une analyse documentaire et bibliographique, par le biais d'une recherche par mots-clés sur Web of Sciences (WoS) (cf. annexe 8.2). Celle-ci a été complétée par de la « littérature grise » : documents institutionnels, rapports d'études, sites internet, etc.)

Des entretiens semi-directifs avec des experts scientifiques et techniques (hydrologues, hydrogéologues, agronomes, etc.) ont été menés en complément, pour :

- d'une part enrichir et confronter les résultats de la recherche bibliographique, identifier plus précisément les questions de recherche relatives à leur domaine scientifique ;
- d'autre part appréhender leur perception des enjeux de connaissance concernant le sujet d'étude, et des enjeux d'accompagnement de la décision en contexte d'incertitude.

Ces entretiens ont mobilisé un échantillon non représentatif de personnes travaillant sur les approches visant à ralentir l'eau dans les versants, sur des processus, ou des outils associés (par exemple des modèles hydrologiques). La plupart des experts scientifiques interrogés ont été identifiés en fonction de leurs projets de recherche et publications proches du sujet de cette synthèse. C'est le cas de (apparaissant par ordre chronologique des entretiens) :

- Clément Fabre, post-doctorant au CNRS (UMR CRBE, Toulouse) ; impliqué dans le projet de mise en œuvre et de suivi de « mesures éponges » sur le bassin de la Lèze (en cours de lancement, dans le cadre du projet européen *Spongeworks*¹). Entretien réalisé le 09/12/2025.
- Adrien Selles, hydrogéologue au BRGM (UMR G-EAU, Montpellier) ; impliqué dans le projet SFN-ESO (AERMC) visant à évaluer les effets hydrogéologiques et économiques de solutions fondées sur la nature appliquées à la gestion durable des eaux souterraines² (Hérivaux, Selles and Le Coënt, 2023; Selles *et al.*, 2023). Entretien réalisé le 10/12/2025.
- Charles Perrin, ingénieur-chercheur en hydrologie à INRAE (UR HYCAR, Antony) spécialisé sur le développement et l'application de modèles hydrologiques conceptuels, a été sollicité pour un avis plus spécifique sur la capacité des modèles hydrologiques à représenter et évaluer les effets de changements de l'état de surface sur le régime hydrologique. Entretien réalisé le 19/12/2025.

¹ <https://spongeworks.eu/>

² <http://ficheinfoterre.brgm.fr/document/RP-72417-FR> ; <https://www.eaurmc.fr/upload/docs/application/pdf/2023-12/2-3-herivaux-sfngesteso-aermc-2023.pdf>

- Aurore Degré, professeure à l'université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech, spécialisée en hydrologie et physique des sols ; impliquée dans le projet de modélisation du bassin versant de la Vesdre faisant suite aux inondations de 2021 et à l'élaboration d'un schéma stratégique de reconstruction par la région wallonne¹ (Convention MODREC-Vesdre, 2023). Entretien réalisé le 07/01/2025.
- Lionel Alletto, agronome spécialisé en sciences du sol, directeur de recherche à INRAE (UMR AGIR, Toulouse) ; impliqué dans le projet de recherche BAG'AGES² visant à caractériser les effets des pratiques agroécologiques sur la circulation de l'eau sur des exploitations agricoles en Adour-Garonne (Alletto and Bustillo, 2023), et membre du comité scientifique de l'Agence de l'eau Adour-Garonne. Entretien réalisé le 08/01/2025.
- Jérôme Molénat, chercheur en hydrologie à INRAE (UMR LISAH, Montpellier) ; avec une expertise des techniques de conservation des sols et de l'eau développées en Tunisie, des infrastructures de collecte de l'eau et plus largement de l'impact de l'agriculture (pratiques et infrastructures) sur la circulation de l'eau de la parcelle au bassin versant (Molénat *et al.*, 2023). Entretien réalisé le 15/01/2025.

D'autres personnes ont été identifiées et interrogées pour leur expérience et expertise, et leur rôle d'interface entre la production de connaissance et l'accompagnement des acteurs dans la mise en œuvre :

- Olivier Hébrard, docteur en hydrologie, et consultant en agroécologie, permaculture, gestion intégrée de la ressource en eau. Il forme et accompagne des agriculteurs et collectivités pour une gestion intégrée de l'eau sur leurs parcelles ou leur territoire (exemple de projets suivis : le domaine agroécologique du Monastère de Solan dans le Gard, la régénération de plusieurs bassins versants démonstratifs dans le massif du Siroua, au Maroc). Entretien réalisé le 09/01/2025.
- Benoît Fribourg-Blanc, ingénieur agronome et chef de projet à l'Office international de l'eau (OiEau), impliqués sur les projets *NWRM* (2013-2015), *OPTAIN* (depuis 2020), *Spongescapes* et *Spongeworks* (depuis 2023 et 2024 respectivement), financés par l'union européenne, portants sur les « mesures naturelles de rétention d'eau » et les « mesures éponge ». Entretien réalisé le 13/01/2025.
- Jean-Charles Montaufier et Simon Ricard, membres du bureau d'étude Permalab, qui accompagne et forme aux approches de l'agriculture et de l'hydrologie régénérative, par le design et l'aménagement de parcelles, fermes ou territoires. Simon Ricard est également cofondateur et co-président de l'association « Pour une Hydrologie Régénérative » (PUHR). Entretien réalisé le 22/01/2025.
- Judith Eeckman, titulaire d'un doctorat en hydro-climatologie de montagne, spécialisée depuis 2014 sur l'étude de la réponse hydrologique de la zone non saturée du sol sous différentes conditions atmosphériques et de leur contribution à la ressource en eau (thèse au CNRS, post-doctorats à Météo France et à l'Université de Lausanne). Elle est impliquée dans l'association PUHR et travaille actuellement sur l'évaluation des impacts des Plans Territoriaux de Régénération des Cycles de l'Eau (PTRCE) pour PUHR (Eeckman *et al.*, 2025), et sur la modélisation hydrologique du bassin du Bost pour l'agglomération de Valence Romans (VRA). Entretien réalisé le 28/01/2025.

Enfin, deux ingénieurs territoriaux ont également été interrogés le 21/01/2025, afin de recueillir leur expérience vis-à-vis de la mise en œuvre potentielle de projets d'hydrologie régénérative ;

¹ <https://territoire.wallonie.be/fr/page/inondations#schema-strategique-vesdre> ; https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/314437/2/MODREC%20Note%20aux%20D%C3%A9cideurs_Vfinal.pdf

² https://eau-grandsudouest.fr/sites/default/files/2022-01/Plaqueette%20Bagages_2021.pdf

les questionnements et difficultés rencontrées au sein des collectivités territoriales ; ainsi que leur perception des besoins de production de connaissance et d'accompagnement.

- Claire Petitjean, hydrogéologue de formation, avec une expérience dans la recherche (transfert de polluants sol/aquifère à IRD Nouméa, CIRAD Guadeloupe, INRAE Lyon), et actuellement employée par le Syndicat Mixte de la Rivière Drôme (SMRD) pour l'animation du SAGE Drôme.
- Un ingénieur en génie civil et hydraulique, avec des expériences dans la recherche et en bureau d'étude sur de la modélisation hydrologique et hydraulique, ainsi qu'en collectivité territoriale sur la gestion du ruissellement et des réseaux d'assainissement.

De par la diversité des expertises et expériences liées au sujet d'étude, la grille d'entretien préalablement constituée (disponible en Annexe 8.3) a été adaptée selon la personne interrogée, l'objectif et le déroulé de l'entretien. Les grands thèmes traités étaient : leur travail et leurs projets de recherche en lien avec cette thématique (objets, questions et méthodes de recherche) ; leur évaluation ou perception de l'état de la connaissance sur les effets hydrologiques quantitatifs de ces mesures de ralentissement de l'eau dans les bassins versants, du potentiel et des limites des méthodes d'évaluation (modèles, etc.) ; les principales incertitudes, fronts de recherche ou controverses identifiées dans leur domaine de recherche ; leur expérience d'accompagnement ou d'interactions avec des acteurs opérationnels. Quelques éléments d'expertise de Nadia Carlier, chercheuse en hydrologie à l'unité de recherche Riverly (INRAE) et co-encadrante de ce stage, sont également rapportés concernant la modélisation hydrologique.

3. Etat de la connaissance

3.1. Introduction des processus hydrologiques, des enjeux et des notions associées au ralentissement et à la conservation de l'eau dans les versants

3.1.1. Processus hydrologiques

A l'échelle d'une parcelle agricole ou d'un terrain forestier, l'eau arrive par les précipitations, par le ruissellement de l'amont, ou par l'irrigation. Elle se distribue ensuite dans les compartiments environnementaux selon différents processus (Figure 1). Une part de cette eau s'évapore après l'interception par la canopée ou depuis le sol. Une autre part s'infiltre, permettant la recharge de la réserve en eau du sol. Cette réserve est mobilisable par les végétaux, et repart en partie vers l'atmosphère par transpiration. Le reste s'écoule en surface (phénomène de ruissellement (runoff)) et peut favoriser des processus d'érosion. L'eau ruisselée peut s'écouler vers l'exutoire en restant à la surface du sol, ou bien s'infiltrer dans le sol, voire percoler en profondeur vers un aquifère et contribuer à des écoulements souterrains. Des écoulements latéraux de subsurface (entre la surface du sol et la zone aquifère), non représentés sur la Figure 1, peuvent avoir lieu. Ils sont favorisés par les ruptures de perméabilité.

De nombreux facteurs influencent ces processus :

- **L'évapotranspiration** (somme de l'évaporation et de la transpiration) dépend du vent, de la température de l'air, des espèces végétales présentes (de leur besoin en eau, leur profondeur et leur densité racinaires), et du niveau de stress hydrique (disponibilité de l'eau dans le sol).
- La **partition des écoulements verticaux et latéraux** (écoulements de surface et de subsurface) dépend de la rugosité du sol, de sa structure (porosité, perméabilité), de la pente, de la texture du sol impactant sa porosité et sa perméabilité (par exemple, les sols sableux favorisent l'écoulement de l'eau par rapport aux sols limono-argileux), voire de son activité biologique (présence de racines, de vers de terre, de micro-organismes). Les écoulements souterrains dépendent principalement de la géologie du site (type de roche et état).

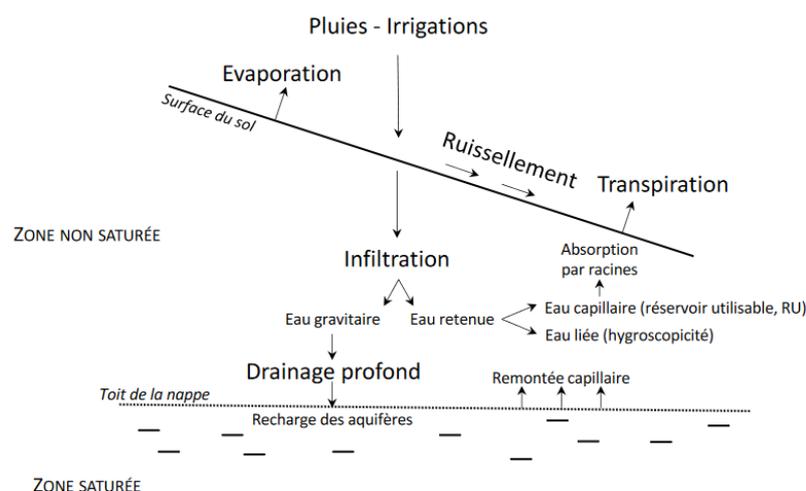


Figure 1 – Principaux processus régissant le devenir de l'eau arrivant sur une parcelle agricole

Figure 1 - Schématisation des processus hydrologiques à l'échelle d'une parcelle agricole (source : Alletto and Bustillo, 2023)

A l'échelle d'un versant (Figure 2), les écoulements de surface, de subsurface et les affluents contribuent au débit à l'exutoire. L'eau s'étant infiltrée et ayant percolé vers des compartiments

souterrains peut atteindre l'exutoire, ou bien sortir du bassin versant (les découpages des bassins hydrologiques et hydrogéologiques ne sont pas forcément cohérents). Les zones à l'amont du bassin, appelées « têtes de bassin versant » sont particulièrement intéressantes car elles impactent l'aval et gouvernent en partie le fonctionnement des hydrosystèmes plus importants (Bishop *et al.*, 2008).

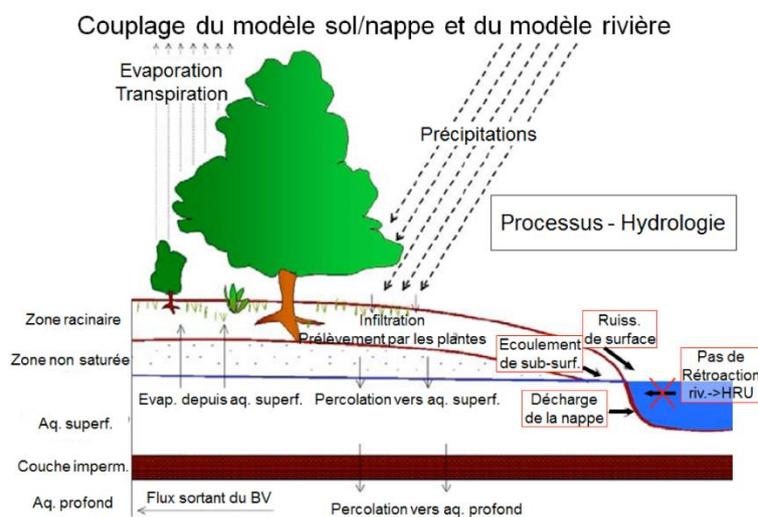


Figure 2 - Schématisation des processus hydrologiques et écoulements sur un versant (source : illustration issue de la documentation de la plateforme MAELIA¹)

On peut caractériser le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant en étudiant les relations entre les précipitations reçues sur la surface du bassin (mesurées par des pluviomètres), et le débit à son exutoire (mesuré dans le cours d'eau). Cependant, pour caractériser et quantifier les contributions respectives de chaque type d'écoulement et de l'évapotranspiration au bilan hydrique du bassin versant, il s'avère nécessaire de suivre d'autres variables.

Les variables météorologiques (telles que l'intensité et la fréquence des précipitations, la température, etc.) ainsi que les caractéristiques physiques du bassin versant influencent donc directement la quantité d'eau et sa circulation entre les différents compartiments, ce qui peut entraîner des enjeux significatifs.

3.1.2. Enjeux liés à la quantité d'eau sur des petits bassins versants ruraux

Les enjeux de ralentissement et de rétention d'eau dans les versants sont liés aux aléas hydrométéorologiques et à leurs conséquences sur : les écosystèmes, les infrastructures et populations humaines ; les activités agricoles et forestières ; et les autres usages anthropiques de l'eau. Les effets se manifestent à l'échelle de la parcelle agricole, de l'exploitation, des versants, ou des bassins versants à plus large échelle.

Certains enjeux sont liés à un **excès d'eau** : ruissellement important, érosion, coulées de boues, voire inondations. La topographie (forte pente), les propriétés des sols (impermeabilisés, compactés) et la structure du paysage (uniformisé) peuvent augmenter ces aléas. L'exposition à ces aléas hydrométéorologiques dépend également de l'organisation du paysage et de l'urbanisation (ex : zones d'habitations placées en aval direct de sols pentus agricoles). Sont touchées les zones exposées en aval mais également les terrains cultivés à l'amont, à travers notamment la perte de sol et d'éléments nutritifs.

¹ <http://maelia-platform.inra.fr>

D'autres enjeux sont liés au **manque d'eau** : sécheresses météorologiques (déficit de précipitations), agricoles (sols secs), hydrologiques (faibles débits des cours d'eau, assecs) voire hydrogéologiques (faible recharge des nappes)¹. Les pratiques agricoles impactent les propriétés hydrodynamiques des sols et par là leur capacité à retenir l'eau pour les cultures (Alletto and Bustillo, 2023). Les techniques conventionnelles (labour), et le drainage du sol ont pour conséquence d'assécher celui-ci sur le long terme (Piscart *et al.*, 2009; Lucas-Borja *et al.*, 2019). La sylviculture et la gestion forestière sont aussi concernées par ces enjeux. Des conséquences importantes du manque d'eau sont également observées sur la santé des écosystèmes aquatiques (étiages, non atteinte des débits minimums biologiques, déconnexion de la nappe), et sur la sécurité d'approvisionnement des usages (ex : faible recharge d'un aquifère exploité pour l'approvisionnement en eau potable).

On propose de classer ces principaux enjeux par type de milieu concerné, et de distinguer les enjeux liés à l'excès d'eau et ceux liés au déficit en eau. Un territoire peut être touché par les deux problématiques, et présenter les trois types de milieux (agricole, forestier et aquatique). La figure 3 présente un placement de ces enjeux selon l'échelle spatiale concernée ; et selon la fréquence ou le caractère continu/ponctuel de l'aléa associé. On se concentre ici sur les enjeux liés à l'eau d'ordre quantitatif. D'autres problématiques peuvent néanmoins être reliées à l'objet d'étude, par exemple, la qualité de l'eau et des sols. En effet, ralentir la circulation de l'eau dans les versants permet d'éviter le transfert rapide de polluants vers les masses d'eau superficielles et souterraines (CORPEN/Groupe Zones tampons, 2007; Tournebize *et al.*, 2024).

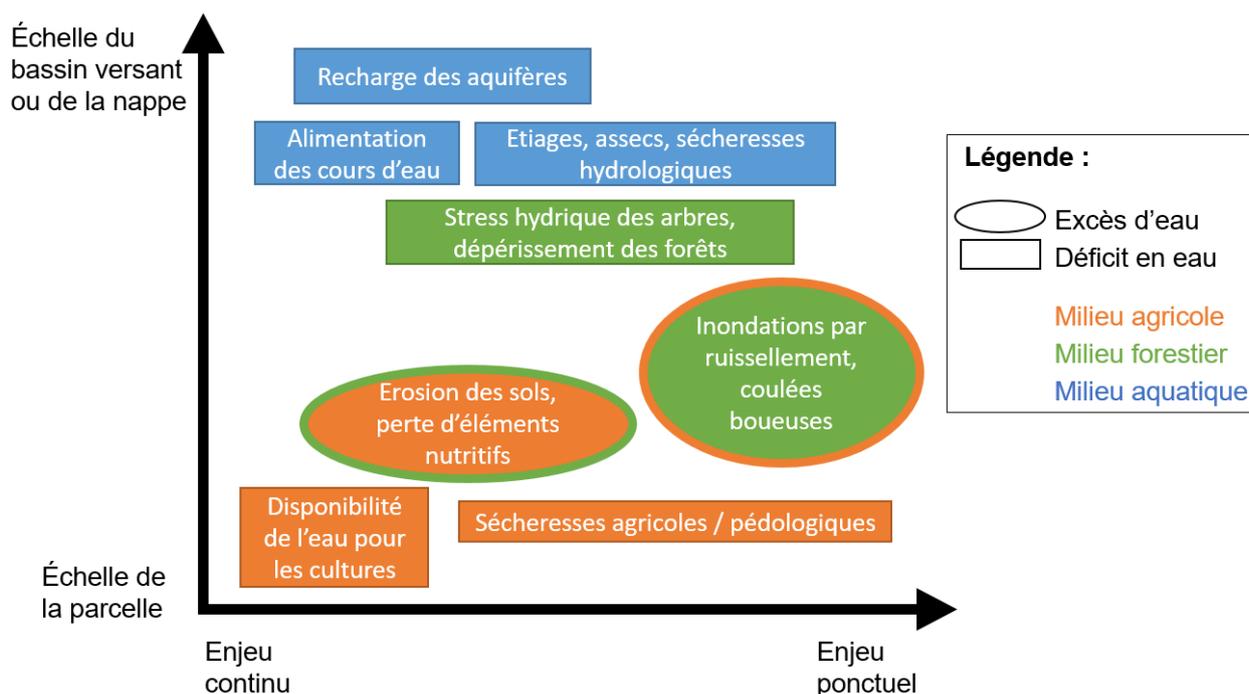


Figure 3 - Schématisation des enjeux identifiés liés à la quantité d'eau sur des bassins versants ruraux, en fonction de l'échelle spatiale et temporelle à laquelle ils se manifestent. A noter : la qualification des enjeux de continu à ponctuel est approximative, d'autant qu'elle peut évoluer avec le changement climatique. Les deux encadrés bicolores concernent autant les milieux agricoles que forestiers (source : autrice).

Le changement climatique a tendance à augmenter la fréquence et l'intensité de ces aléas (sécheresses, inondations, etc.). Ralentir la circulation de l'eau et la retenir dans ou grâce à des éléments du paysage pourrait réduire l'intensité de ces aléas et leurs conséquences sur les milieux, en temporisant l'arrivée des flux à l'exutoire, en atténuant le ruissellement et en favorisant l'infiltration

¹ <https://agriculture.gouv.fr/quelle-difference-entre-secheresse-aridite-manque-deau-et-stress-hydrique>

de l'eau et son stockage dans les versants. Dans une certaine mesure, une gestion dès l'amont des flux peut permettre d'atténuer le ruissellement et ses conséquences en aval, et peut compléter ou remplacer une gestion plus « traditionnelle » (l'installation des zones de rétentions temporaires au niveau ou juste avant les zones à enjeux par exemple). Pour des enjeux agricoles liés à de trop faibles précipitations, une capacité de rétention accrue de l'eau dans les sols peut également limiter le besoin d'irrigation et le recours à des infrastructures de stockage.

3.1.3. Diversité des notions associées, origines et utilisation

Différentes notions émergent depuis quelques années pour qualifier et catégoriser les fonctions des milieux (semi)-naturels vis-à-vis de la rétention de l'eau et de l'atténuation d'aléas hydrométéorologiques. Elles proviennent de communautés distinctes, s'adressent à différents publics avec des approches et objectifs variés. Les notions les plus fréquemment rencontrées au cours de la recherche bibliographique menée sont : les Solutions Fondées sur la Nature (SFN), les Mesures Naturelles de Rétention d'Eau (MNRE), les mesures et paysages éponges, et l'Hydrologie Régénérative (HR). D'autres termes sont également employés, et qualifient des catégories de mesures de manière plus opérationnelle, tels les « aménagements d'hydraulique douce » (utilisé notamment par des collectivités dans le nord de la France)¹, les « éléments d'atténuation du ruissellement » (run-off attenuation features en anglais), les pratiques et systèmes de « conservation de l'eau et des sols » (utilisé dans un contexte agricole, en France mais surtout ailleurs, au Maghreb par exemple), etc.

Ces notions empruntent à différentes disciplines et ensembles de pratiques : génie écologique (ou végétal), agroforesterie, agroécologie, correction torrentielle, etc.

Les Solutions Fondées sur la Nature / Nature-Based Solutions

La notion de « Solutions Fondées sur la Nature » (dites SFN – ou Nature-Based Solutions (NBS) en anglais) a été développée à partir des années 2010. Plusieurs définitions ont été formulées par différents acteurs internationaux, dont l'IUCN (l'union internationale pour la conservation de la nature, une organisation non gouvernementale) (Cohen-Shacham *et al.*, 2016), la Commission européenne (European Commission: Directorate-General for Research and Innovation, 2015), l'OCDE (OECD, 2020), et l'UNESCO ((WWAP / ONU-Eau, 2018)). Ces définitions varient légèrement, y compris concernant les SFN spécifiques aux enjeux liés à l'eau (cf. en annexe 8.4 le tableau de comparaison issu de Lalonde *et al.* (2024)). Les membres de l'IUCN ont adopté en 2016 la définition suivante, servant souvent de référence depuis² : les SFN désignent « *les actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité* ». Des typologies selon le niveau d'intervention humaine sur les écosystèmes ont été proposées par des chercheurs en 2015 (Eggermont *et al.*, 2015). Un standard avec des critères et indicateurs a été élaboré par l'IUCN en 2020 selon une approche intégrative multi-enjeux, dans le but d'apporter un cadre à l'utilisation du terme SFN³.

De nombreuses publications s'intéressent au contexte d'émergence de ce concept, à son lien avec des notions antérieures ou complémentaires visant à valoriser la biodiversité, et à sa plus-value

¹ L'hydraulique douce est un terme utilisé par des acteurs locaux (chambres d'agriculture, syndicats de bassin,...) pour qualifier les aménagements et techniques permettant de gérer les eaux pluviales dès l'amont, en les infiltrant, pour réduire le ruissellement et limiter l'érosion <https://marn.chambres-agriculture.fr/sinformer/agro-environnement/lutte-contre-lerosion> ; <https://www.bvarques.fr/nos-actions/limiter-l-%C3%A9rosion-et-le-ruissellement-agricole/hydraulique-douce/> ; <https://symvahem.fr/la-prevention-des-inondations-dans-la-vallee-de-la-hem/lhydraulique-douce-vallee-de-la-hem/>

² https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/resrecfiles/WCC_2016_RES_069_EN.pdf

³ <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2020-020-En.pdf>

conceptuelle et pratique notamment dans la gestion des risques liés à l'eau et l'adaptation au changement climatique (Nesshöver *et al.*, 2017; Chausson *et al.*, 2020; Martin, Costa and Manez, 2020; Seddon *et al.*, 2020). D'après ces auteurs, le concept de SFN est spécifique dans son approche intégrative et systémique, et le cadre défini par la Commission européenne fournit l'opportunité de recherches transdisciplinaires pour leur conception et leur implémentation. Ils alertent toutefois sur le possible mésusage du terme et l'assimilation de ces actions à des solutions peu chères et faciles (Nesshöver *et al.*, 2017). En effet, les SFN ont tendance à être abordées dans les politiques climatiques seulement dans le cadre de l'atténuation, avec des projets de stockage naturel de carbone via de la plantation d'arbres par exemple. Des scientifiques recommandent de mieux y intégrer les considérations sociales et écologiques (Seddon *et al.*, 2020). Dans le cadre de l'adaptation au changement climatique, les SFN pourraient apporter des bénéfices multiples comparées à d'autres stratégies (Martin, Costa and Manez, 2020) ; et montreraient autant voire plus d'efficacité que des interventions alternatives (telles que des solutions dites grises) pour adresser les impacts d'aléas climatiques (Chausson *et al.*, 2020).

Dans les sciences environnementales et la gestion des risques liés à l'eau, le concept de SFN s'est largement diffusé : une recherche sur le WoS avec la requête « nature-based solutions » AND « water » donne 913 résultats (dont 14 très cités et 109 revues de la littérature s'appliquant à des contextes, enjeux, types de SFN différents) depuis 2016 (Figure 4). Ce concept semble majoritairement étudié et appliqué pour des contextes urbains (gestion des eaux pluviales, lutte contre les îlots de chaleur urbains), puis fluviaux et littoraux (retrait du trait de côte, gestion du risque de submersion, du risque inondation dans les plaines fluviales) (cf. recherche WoS en annexe 8.2). Il s'étend désormais progressivement aux contextes ruraux, et aux enjeux de sécheresse (Fennell *et al.*, 2023; Yimer, 2024).

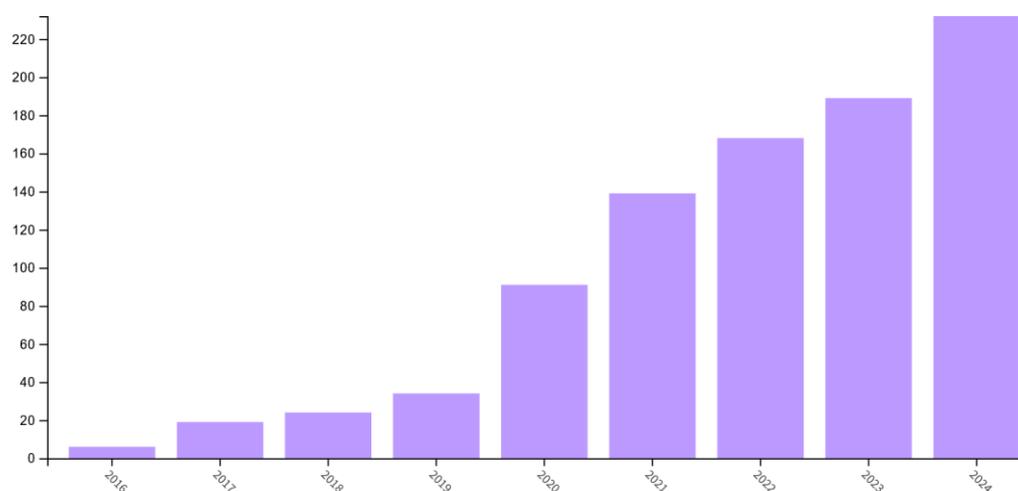


Figure 4 - Résultats d'une recherche bibliographique basée sur les mots-clés « nature-based solutions » et « water » dans la base Web of Science (recherche effectuée le 23/01/2025, graphique généré par WoS).

Des travaux de recherche en sciences sociales se sont penchés sur l'utilisation de ce terme par les institutions françaises, sur ses effets sur les politiques de l'eau et de gestion des risques (littoraux et fluviaux en particulier), et sur l'appropriation locale du concept (Drapier, Guerrin and Rey, 2023; Guerrin, Fernandez, et al., 2023; Guerrin, Serra-Llobet, et al., 2023; Pelet and Rieu, 2023; Rey et al., 2023; Drapier et al., 2024).

En France, le concept semble très lié à la définition de l'UICN, surtout soutenu par les acteurs de la conservation de la nature, et encore peu approprié en revanche par les acteurs de la gestion des inondations (Guerrin, Serra-Llobet, et al., 2023). Dans les orientations des Agences de l'eau, les

SFN s'intègrent d'une part dans la continuité des actions menées pour la préservation des milieux aquatiques (telles la restauration écologique), et constituent d'autre part une manière de désigner les techniques alternatives de gestion des eaux pluviales (telles la désimperméabilisation, les noues d'infiltrations, les arbres de pluie, etc.) (Drapier, Guerrin and Rey, 2023).

Les auteurs soulignent une institutionnalisation assez forte du concept avec des modalités d'appropriation variables à l'échelle locale (Drapier et al., 2024). Selon les cas, les acteurs locaux utilisent le terme de manière stratégique (pour des financements par exemple), ou bien ils ne mobilisent pas du tout le concept malgré des pratiques et approches similaires. D'autres critiques portent sur les déclinaisons locales du concept de SFN, quand les actions en relevant ne sont mises en œuvre qu'aux endroits où les enjeux sont faibles et/ou là où les écosystèmes peuvent être valorisés économiquement (exemples en gestion du littoral et des risques de submersion notamment). Elles constitueraient alors une simple adaptation incrémentale et non transformationnelle, s'éloignant des ambitions et du discours de changement de paradigme associé aux SFN (Pelet and Rieu, 2023).

D'autres auteurs mettent en avant auprès des institutions et des gestionnaires le savoir-faire déjà existant et les nombreuses recherches susceptibles d'accompagner la mise en œuvre de SFN dans le domaine de la gestion de l'eau, en particulier pour la préservation de la ressource en eau (Rey et al., 2023).

Plus récemment, le développement des SFN pour l'adaptation au changement climatique est encouragé par la diffusion de guides, la mise en place de projets d'accompagnement des politiques publiques, etc. (impliquant l'OFB, le CEREMA, l'ADEMA...)¹.

Les Mesures Naturelles de Rétention d'Eau / Natural Water Retention Measures

La notion de « mesures naturelles de rétention d'eau (dites MNRE – ou Natural Water Retention Measures (NWRM) en anglais) a été introduite par la direction générale de l'environnement (DG ENV) de la Commission européenne dans les années 2010. Ces mesures sont considérées alors dans la perspective de l'atteinte des objectifs de bon état de la directive cadre sur l'eau (DCE).

D'après Benoît Friboug-Blanc (OiEau), le projet NWRM financé par la DG ENV de 2013 à 2015 a eu pour but de structurer cette notion pour les besoins de la mise en œuvre de la DCE, de recenser et de caractériser ces mesures, et enfin de rassembler des retours d'expérience ; afin de guider les autorités nationales et de bassin et de favoriser les aides au financement. Un catalogue des mesures naturelles de rétention d'eau² et de leurs bénéfices (impacts biophysiques, services écosystémiques et objectifs politiques) a été construit dans ce cadre, et est toujours référencé et utilisé dans des projets et guides d'accompagnement (par exemple sur le site de l'OFB³). Ce terme semble cependant moins utilisé que le terme de « SFN » par les institutions en France.

Les MNRE se distinguent des SFN par un centrage sur les effets des mesures sur la rétention d'eau essentiellement, une intégration moins importante des enjeux de biodiversité, et une échelle d'application pouvant être plus localisée (Magnier et al., 2024) (Figure 5).

Enfin, le terme est peu utilisé dans la littérature scientifique : une recherche sur WoS du terme anglais donne seulement 24 résultats.

¹ SaFN d'après le CEREMA <https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/dossiers-thematiques/s-adapter-avec-la-nature/Solutions-adaptaton-fondees-sur-la-Nature> ; projet Life ARTISAN <https://www.ofb.gouv.fr/le-projet-life-integre-artisan>

² Catalogue des mesures : <https://www.nwrm.eu/measures-catalogue> ; études de cas <https://www.nwrm.eu/list-of-all-case-studies> ; et tables de bénéfices <https://www.nwrm.eu/catalogue-nwrm/benefit-tables>

³ <https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1511>

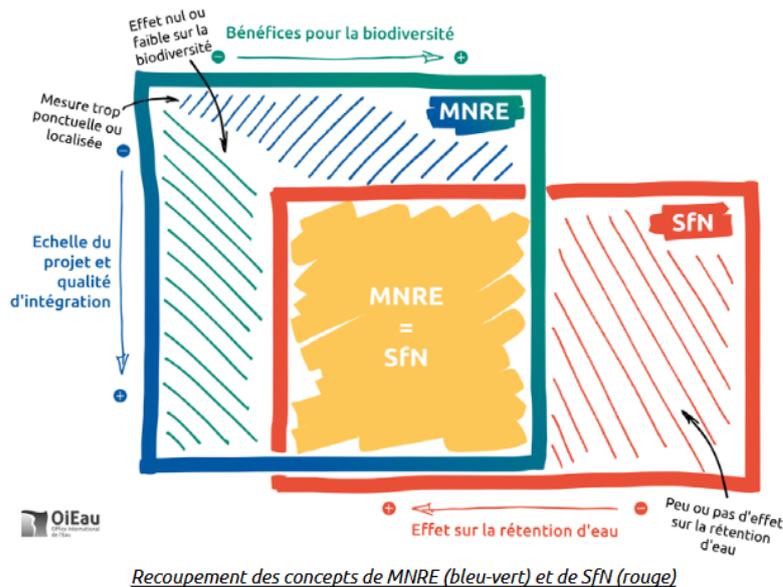


Figure 5 - Schéma illustrant le recouvrement partiel des concepts de MNRE et de SfN (issu du guide sur les différences entre MNRE et SfN produit par l'OiEau¹)

Evolution des MNRE vers les mesures et paysages « éponges » (spongescapes)

Un autre terme a fait récemment son apparition dans des projets financés par l'Union européenne dans lesquels l'OiEau est impliqué : celui de « mesures éponges » ou de « paysages éponges ». Le terme « éponge » désignerait la capacité des paysages à stocker et libérer lentement de grandes quantités d'eau. Ce fonctionnement reposerait sur trois principes clés : 1) réduire le ruissellement en favorisant l'infiltration, 2) ralentir l'écoulement de l'eau à la surface et dans les cours d'eau, et 3) stocker temporairement l'excès d'eau dans le sol, les nappes phréatiques et les masses d'eau de surface (Spongescapes consortium, in press).

D'après le travail de mémoire de master de Louis Bonhoure, l'association de l'éponge au vocabulaire des inondations et de la sécheresse est récente. Son utilisation a augmenté depuis 2015 dans les publications de l'UE, la presse écrite et la littérature scientifique. Selon les entretiens menés pour ce mémoire, le terme « éponge » est facilement compris par une large communauté de parties prenantes, ce qui peut permettre de faciliter la sensibilisation à cette approche et son opérationnalisation (Bonhoure, 2024).

D'après Benoît Fribourg-Blanc (OiEau), les MNRE sont intégrées dans la notion de mesures « éponges », mais elles ne s'y limitent pas : des infrastructures grises peuvent également être considérées pour leurs fonctions « éponge ». Le concept d'éponge propose une approche hybride, alliant infrastructures vertes et grises, suivant le principe « *Green where you can, grey where you must (vert là où c'est possible, gris là où c'est nécessaire)* » (Spongescapes consortium, in press).

L'Hydrologie Régénérative / Regenerative Hydrology

La notion d'« hydrologie régénérative » (HR) a émergé en France de la société civile, et a été rapidement médiatisée. Elle est portée par l'association « Pour une Hydrologie Régénérative » (PUHR) créée en décembre 2022. Ses trois membres fondateurs sont ingénieurs (généralistes, hydrologues, agronomes) avec des expériences dans la permaculture (Simon Ricard co-fondateur

¹ <https://www.oieau.fr/eaudoc/notice/Mesures-naturelles-de-r%C3%A9tention-d%E2%80%99eau-ou-solutions-fond%C3%A9es-sur-la-nature-Note-explicative-sur>

du bureau d'étude Permalab, et Samuel Bonvoisin) ou dans la gestion de l'eau en collectivité territoriale (Charlène Descollonges). Cette association a pour but de « *diffuser la vision, les inspirations, les connaissances et les moyens d'une régénération massive du cycle de l'eau* »¹. Les porteurs de l'HR la définissent comme « *la science de la régénération des cycles de l'eau douce par l'aménagement du territoire* » (définition proposée lors des Rencontres de l'Hydrologie Régénérative à Annecy, le 20 octobre 2022), s'articulant autour de quatre axes : « *ralentir, infiltrer, stocker (dans le paysage), évapotranspirer* ».

Il n'existe pas pour le moment de cadre ou de consensus partagé autour de cette notion, et elle est encore peu utilisée par des scientifiques et des institutions. Cette approche en tant que telle n'a actuellement pas fait l'objet de recherches approfondies associées à des publications. Une recherche dans WoS du terme dérivé en anglais « *regenerative hydrology* » ne donne par exemple aucun résultat. Par contre, cette approche, assez fortement médiatisé, séduit de plus en plus de collectivités territoriales et intéresse également différentes institutions, comme l'Agence de l'eau RMC.

L'HR insiste sur la dégradation des cycles de l'eau (des cycles rendus « *dysfonctionnels* » par le retrait de la végétation, l'artificialisation et l'évacuation de l'eau des sols) et sur la nécessité d'en inverser la tendance. Les promoteurs de l'HR visent à valoriser l'eau verte et ses cycles qu'ils qualifient de « *courts* » (se bouclant sur les continents), par rapport à l'eau bleue et ces cycles « *plus longs* » car passant par les océans. Cette distinction entre eau bleue / eau verte a été proposée par l'hydrologue Malin Falkenmark en 1995 (Rockström *et al.*, 2024) et est utilisée depuis plusieurs années par la communauté scientifique pour la représentation des cycles de l'eau (Abbott *et al.*, 2019). Cette vision des cycles de l'eau s'appuie aussi sur des éléments scientifiques concernant le « *recyclage continental de l'humidité* » (*land moisture recycling*) avançant qu'une grande partie des précipitations continentales sont régulées par l'évaporation et la transpiration de la végétation sur les continents (Keys, Wang-Erlandsson and Gordon, 2016).

D'après les membres de Permalab interrogés, l'approche de l'HR vise à développer une approche de planification et de conception paysagère systémique, intégrant la circulation de l'eau et ses cycles, en articulant cette conception autour de trois éléments, le sol, l'eau, les arbres, formant un « *triolet* » (Figure 6).

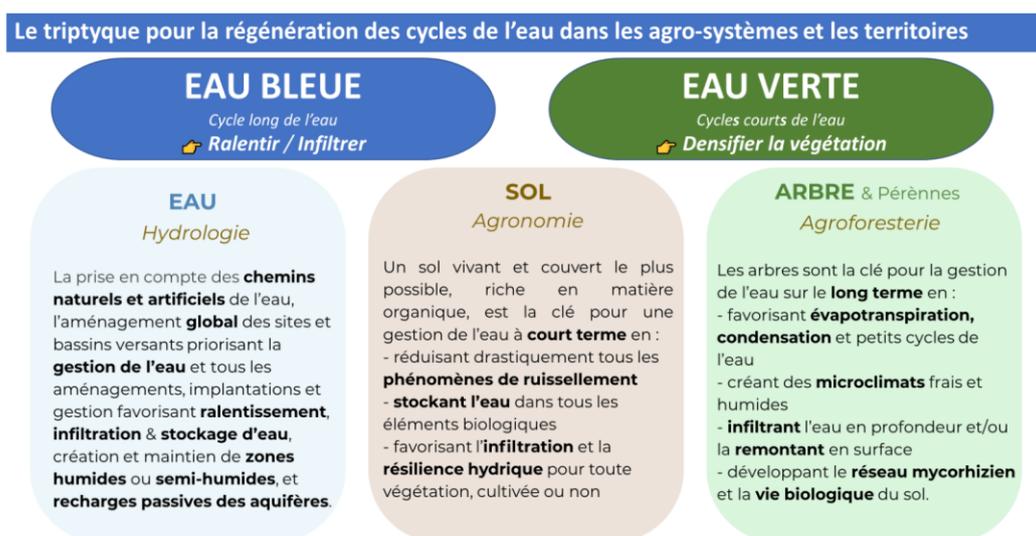


Figure 6 - Présentation du "triolet eau-sol-arbre" proposé par les porteurs de l'hydrologie régénérative (source : support de présentation réalisé par © Permalab)

¹ <https://hydrologie-regenerative.fr/>

Les principales inspirations de l'HR sont issues de la permaculture et de l'agriculture en climat aride :

- Le « rainwater harvesting » (récolte de l'eau de pluie), rassemblant pratiques et ouvrages hydrauliques en contexte agricole aride¹ (cf. partie 3.2.) ;
- Le « keyline design » et l'échelle de permanence², théorisés par P.A. Yeomans, un agriculteur australien considéré précurseur des approches et designs de la permaculture³, et auteur des ouvrages « The Keyline Plan » en 1954, « the Challenge of Landscape » en 1958, « Water for Every Farm » en 1973 ;
- Les « water retention landscape » (paysages aquatiques) réalisés par l'autrichien Sepp Holzer, dans sa ferme de montagne *Krameterhof* et ailleurs dans le monde ; figure de la permaculture et auteur de « Sepp Holzer's Permaculture » (2011) et « Desert or Paradise » (2012)⁴ ;
- Le « new water paradigm » (nouveau paradigme de l'eau) diffusé par le slovaque Michal Kravčík dans son livre « New Water Paradigm – Water for the Recovery of Climate » (2007) et l'ONG *People and Water*⁵. Michal Kravčík, lauréat du prix Goldman en 1999, est connu pour son opposition à la construction d'un barrage pendant l'ère communiste et pour la mise en œuvre d'alternatives décentralisées, comme la construction de micro-ouvrages sur le bassin de la Torysa.

L'HR s'inspire également de pratiques plus institutionnalisées et connues en France, comme l'« hydraulique douce » mise en avant pour gérer l'érosion, ou encore l'agriculture de conservation des sols, l'agroforesterie, etc.

L'association PUHR accompagne actuellement quatre collectivités pilotes de la région Auvergne-Rhône-Alpes afin de mettre en place des aménagements d'hydrologie régénérative sur des parcelles agricoles ou des têtes de BV péri-urbains (sous l'appellation de « plans territoriaux de régénération des cycles de l'eau »). Cet accompagnement, ainsi que le suivi des sites expérimentaux pour l'évaluation des impacts, sont financés par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse. Le plan d'instrumentation a fait l'objet d'une publication (Eeckman *et al.*, 2025).

Ces notions à la fois proches et distinctes semblent toutes chercher à structurer et mettre en œuvre des initiatives visant à ralentir et conserver l'eau. Cependant, que sait-on de l'efficacité de ces approches du point de vue hydrologique, à différentes échelles et pour différents types et intensités d'évènements ?

3.2. Les mesures considérées et l'évaluation de leurs effets hydrologiques localisés

La littérature consultée (dont les références sont détaillées dans le tableau 15 en annexe 8.1) et les entretiens menés mettent en avant un certain nombre de pratiques et d'aménagements s'inscrivant dans une logique de ralentissement et de conservation de l'eau dans le paysage. L'analyse des références identifiées permet de qualifier les effets localisés sur les processus

¹ <https://www.fao.org/land-water/water/water-management/water-storage/fr/>

² Cadre méthodologique de planification agricole et paysagère en permaculture, suivant le degré de « durabilité » des éléments d'un système, du climat aux sols <https://www.cultures-permanentes.com/2023/03/04/quest-ce-que-lechelle-de-permanence-elements-de-base-pour-debutants/>

³ https://en.wikipedia.org/wiki/P._A._Yeomans

⁴ https://en.wikipedia.org/wiki/Sepp_Holzer

⁵ <https://peopleandwater.international/> https://en.wikipedia.org/wiki/Michal_Krav%C4%8D%C3%ADk

hydrologiques et les enjeux quantitatifs liés à l'eau sur les versants. Ces effets peuvent être observés, mesurés, ou modélisés.

Les mesures sont introduites selon le type de levier activé :

- 1) l'adoption de pratiques agricoles et forestières permettant de conserver l'eau et les sols ;
- 2) la restauration, préservation, ou création de milieux naturels ou semi-naturels ;
- 3) La conception de petits aménagements pour ralentir et infiltrer l'eau de ruissellement.

Le tableau 1 recense, à partir des références étudiées, d'une part les effets connus et établis de ces mesures et d'autre part les effets plus incertains ou controversés. Ce recensement doit être considéré avec précaution, notamment en raison de son incomplétude et sa précision limitée (par manque de résultats quantifiés ou en raison de leurs variations selon les contextes). Les effets recensés sont exprimés ici de manière qualitative, les ordres de grandeurs dépendant beaucoup des conditions locales (climatiques, pédologiques, etc.) et des méthodes d'évaluation.

Selon le contexte d'application recherché, des ordres de grandeurs des effets recensés peuvent être trouvés dans certaines publications. Certains projets ou rapports en proposent, comme le projet Spongescapes, dans une *critical review* sur les « fonctions éponges » (cf. tables 5, 6 et 12) (Spongescapes consortium, in press).

Tableau 1 - Recensement des effets hydrologiques par mesure, selon les références étudiées (source : autrice)

Mesures de ralentissement et conservation de l'eau dans les têtes de bassins versant ruraux	Effets hydrologiques évalués (vert : connoté positivement ; rouge : connoté négativement)	Effets hydrologiques plus incertains ou controversés	Références étudiées (publications scientifiques ; littérature « grise » ; entretiens)
ADAPTATION DES PRATIQUES AGRICOLES ET FORESTIERES			
Agriculture de conservation (AC) : limitation du travail du sol, couverts permanents	<p>Une couverture permanente atténue le ruissellement et limite ses effets (érosion, lessivage des nutriments, etc.), minimise l'évaporation du sol, mais augmente la transpiration végétale.</p> <p>La minimisation des perturbations mécaniques du sol favorise les écoulements verticaux dans le sol.</p> <p>Projet BAG'AGES en Adour-Garonne sur des exploitations en AC : augmentation des capacités de rétention (taille du RU) et d'infiltration de l'eau dans le sol (recharge du RU) MAIS trop peu de situations agro-pédoclimatiques étudiées pour établir clairement les effets hydrologiques du travail du sol.</p>	<p>Les résultats concernant l'impact des techniques de conservation sur les capacités d'infiltration du sol ne sont pas tous convergents (évolution positive, neutre ou négative)</p> <p>Peu d'information concernant les effets de combinaison de pratiques agricoles sur le devenir de l'eau</p> <p>Pas de tendance claire (positive ou négative) concernant les effets de l'augmentation de la matière organique dans le sol sur ses capacités de rétention de l'eau</p>	<p>(Wahl <i>et al.</i>, 2004; Alletto and Bustillo, 2023) ;</p> <p>sites internet de la FAO, d' INRAE (dossier AC), du projet BAG'AGES ; (Gendre <i>et al.</i>, 2022)</p> <p><i>Entretiens : Lionel Alletto, Olivier Hébrard,</i></p>
Agroforesterie : association d'arbres à des terrains cultivés	<p>Partie aérienne : peut augmenter l'interception des précipitations, réduire la capacité érosive de l'eau ; fournir de l'ombre et réduire l'évaporation du sol.</p> <p>Obstacle au sol : réduction du ruissellement de surface (volume et vitesse), de la compaction et de l'érosion du sol.</p> <p>Réseau racinaire profond : augmentation de la porosité qui peut ainsi favoriser l'infiltration ;</p> <p>Augmentation de la transpiration végétale, et potentiellement de la compétition hydrique avec les cultures</p>	<p>Effets incertains (positifs, neutres ou négatifs) des arbres sur l'infiltration profonde, sur la disponibilité de l'eau pour les cultures et sur le bilan hydrique global (selon la prédominance des effets)</p> <p>Rôle à préciser du réseau racinaire et des effets des réseaux mycorhiziens pour la prospection des réserves plus profondes et la redistribution dans le sol (ascenseur hydraulique) ;</p>	<p>(Zhu <i>et al.</i>, 2020; Molénat <i>et al.</i>, 2023) ;</p> <p>Sites internet de l'AFAC, du ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire</p> <p><i>Entretiens : Lionel Alletto, Simon Ricard et Jean-Charles Montaufier, Aurore Degré</i></p>
Drainage contrôlé ou adapté	Objectif de réduction du drainage classique et de ses effets : améliore la rétention de l'eau dans le sol		(Carlier <i>et al.</i> , 2022), catalogue des MNRE sur NWRM.eu
Tracé des routes ou chemins	Une pente faible permet de réduire le ruissellement et l'érosion sur les chemins		(Soulis, Dercas and Papadaki, 2015) Catalogue MNRE, Permalab

Mesures de ralentissement et conservation de l'eau dans les têtes de bassins versant ruraux	Effets hydrologiques évalués (vert : connoté positivement ; rouge : connoté négativement)	Effets hydrologiques plus incertains ou controversés	Références étudiées (publications scientifiques ; littérature « grise » ; entretiens)
RESTAURATION, PRESERVATION ET CREATION DE MILIEUX (SEMI)-NATURELS			
Prairies, haies, bandes enherbées (IAE)	<p>Les effets localisés des arbres sont détaillés dans « Agroforesterie »</p> <p>Bandes enherbées : favorisent l'infiltration dans le sol par rapport à un sol nu</p> <p>Prairies augmentent la capacité de recharge par rapport aux terres cultivées et aux forêts, sur une pente <20% (au-delà, l'augmentation du ruissellement devient trop importante)</p>	L'efficacité pour la gestion des pollutions et du ruissellement est bien établie, mais les effets (positifs ou négatifs) sur la quantité d'eau disponible dans des situations de déficit de précipitation restent à approfondir.	(CORPEN/Groupe Zones tampons, 2007; Carlier <i>et al.</i> , 2017; Selles <i>et al.</i> , 2023)
Forêts	<p>Les effets localisés des arbres sont détaillés dans « Agroforesterie »</p> <p>L'infiltration est plus importante dans les sols forestiers que d'autres types de végétalisation, mais l'évapotranspiration est plus importante également</p> <p>Dans les climats humides / tropicaux : effets positifs sur la recharge, et les faibles débits (étiages)</p> <p>Effets positifs du boisement sur la réduction du nombre de crues et sur le retard et l'atténuation des pics de crues</p>	<p>Effets incertains (positifs ou négatifs) sur les débits d'étiage et sur la recharge en climat tempéré ;</p> <p>Effets contradictoires sur les sécheresses (augmentation ou diminution de leur sévérité)</p> <p>Des hypothèses plus ou moins controversées sur les effets des forêts sur la circulation des nuages et les précipitations locales (théories de la pompe biotique, des bio-condensateurs, etc.)</p>	<p>(Andréassian, 2004; Neary, Ice and Jackson, 2009; Morris <i>et al.</i>, 2014; Ellison <i>et al.</i>, 2017; Selles <i>et al.</i>, 2023; Douville <i>et al.</i>, 2024; Lalonde <i>et al.</i>, 2024; van Meerveld and Seibert, 2024) ;</p> <p><i>Entretiens : Adrien Selles, Charles Perrin, Aurore Degré, Lionel Alletto, Jérôme Molénat, Olivier Hébrard, Judith Eeckman, Simon Ricard et Jean-Charles Montaufier</i></p>
CONCEPTION DE PETITS AMENAGEMENTS			
Infrastructures d'atténuation du ruissellement, de collecte et de conservation de l'eau	<p>Les microréservoirs, les canaux de conservation et les terrasses semblent contribuer à diminuer le ruissellement et à augmenter l'infiltration (connaissance empirique en partie mesurée), malgré une compréhension incomplète de ces effets, qui dépendent fortement des conditions topologiques et pédoclimatiques.</p>	<p>Effets incertains sur l'évaporation</p> <p>Peu d'études sur les effets des canaux de dérivation</p> <p>A approfondir : effets hydrologiques cumulés d'une multitude de petites retenues sur un BV</p>	<p>(Locatelli <i>et al.</i>, 2015; Habets <i>et al.</i>, 2018; Jodar <i>et al.</i>, 2022; Molénat <i>et al.</i>, 2023; Lalonde <i>et al.</i>, 2024)</p> <p>(WWAP / ONU-Eau, 2018; Carlier <i>et al.</i>, 2022)</p> <p>Supports de présentation du BE Permalab</p> <p><i>Entretiens : Jérôme Molénat, Olivier Hébrard, Simon Ricard et Jean-Charles Montaufier, Aurore Degré</i></p>

L'adoption de pratiques agricoles et forestières permettant de conserver l'eau et les sols

Pratiques de conservation des eaux et des sols / Soil and water conservation measures

Ces pratiques sont formalisées par la définition de la FAO de l'« agriculture de conservation » (AC). Ce type d'agriculture vise à conserver la fertilité des sols agricoles, en luttant contre leur dégradation, et en particulier contre l'érosion¹.

L'agriculture de conservation a été officiellement définie par la FAO en 2001, comme reposant sur trois grands principes :

- La **suppression du travail du sol** (semis direct) ou une perturbation mécanique minimale (seule la perturbation de la ligne de semis est tolérée)
- Une **couverture organique permanente du sol** (faite de résidus de culture ou de couverts semés – des cultures intermédiaires dites « de service » ou « de couverture »)
- La **diversification des espèces** cultivées (rotations culturales plus ou moins longues et cultures associées – cultures intercalaires, polyculture, semis sous couvert)

Ces techniques sont relativement diffusées, puisqu'il est estimé qu'en 2016, environ 12,5 % de l'étendue des terres cultivées dans le monde (soit 1,8 million de km²) le sont en agriculture de conservation, avec une grande variabilité selon les régions (Kassam, Friedrich and Derpsch, 2019). En France, l'association pour la promotion d'une agriculture durable (APAD) estime que seulement 2% des agriculteurs français mettent en œuvre une agriculture de conservation des sols, représentant environ 4 à 5 % de la Surface Agricole Utile (SAU) française². Selon les entretiens, ces pratiques impliquent un changement de matériel et d'habitudes de travail conséquent.

Parmi les autres services et bénéfices rendus, les techniques d'AC améliorent les propriétés hydrodynamiques du sol.

Contrairement à un sol nu qui est vulnérable, une **couverture permanente** réduit le ruissellement et limite ses effets (érosion, perte de sol, lessivage des nutriments) et minimise l'évaporation du sol (Gendre et al., 2022). Ces couverts impliquent en revanche plus de transpiration végétale.

La **perturbation mécanique** du sol modifie sa structure, sa porosité, son état d'agrégation, sa rugosité de surface (Alletto and Bustillo, 2023). La minimisation de ces perturbations, et les autres pratiques de conservation, permettent de passer d'un fonctionnement des écoulements à « dominante latérale » à un fonctionnement à « dominante verticale » (Wahl *et al.*, 2004). La figure 7 illustre les effets du labour sur la concentration de l'eau pendant un événement de précipitations intenses. Néanmoins, les résultats de la littérature scientifique concernant l'impact de ces techniques de travail du sol sur ses capacités d'infiltration ne sont pas tous convergents. Selon les cas, les capacités d'infiltration du sol sont évaluées comme étant plus importantes, équivalentes ou plus faibles que celles observées en systèmes labourés. Selon Alletto et Bustillo (2023), ces résultats contradictoires peuvent cependant être liés à une mauvaise évaluation du fonctionnement hydrique des sols (mesures d'infiltrabilité imprécises).

Enfin, d'après Molénat et al. (2023), la **diversification végétale** (via la culture intercalaire ou la polyculture par exemple) peut permettre d'optimiser l'utilisation de l'eau, en améliorant l'absorption de l'eau dans le profil du sol (du fait d'un réseau racinaire dense et distribué spatialement de manière complémentaire). Dans cette publication, la diversification est mise en

¹ Cf le [dossier INRAE](#) sur l'agriculture de conservation, ou le [site de la FAO](#)

² <https://www.apad.asso.fr/agriculture-de-conservation-3/principes-de-lac>

avant comme stratégie d'adaptation de l'agriculture pluviale méditerranéenne au changement climatique.



Figure 7- Illustration des effets du travail du sol (labour) dans un champ après de fortes précipitations (illustration issue de WWAP / ONU-Eau, 2018)

Le projet **BAG'AGES**¹, mené entre 2016 et 2020 sur 59 exploitations en agriculture de conservation (AC) dans le bassin Adour-Garonne, a mis en avant des effets sur le fonctionnement hydrique du sol (Alletto and Bustillo, 2023). Les résultats du projet montrent qu'après plusieurs années de mise en œuvre de leviers agroécologiques de conservation, les capacités de rétention en eau sont sensiblement améliorées. En effet, la taille du réservoir utilisable (RU) des sols augmente de 8 à 10% selon les cas (ce qui reste inférieur au « doublement des capacités de rétention » souvent avancé)². En revanche, les résultats montrent que l'AC augmente significativement la capacité à valoriser ce réservoir utile : les capacités d'infiltration en eau, et donc de recharge du RU des sols, sont effectivement plus importantes, et plus stables dans le temps.

Il reste néanmoins important de préciser que trop peu de situations agro-pédoclimatiques ont été étudiées pour pouvoir établir clairement les effets du travail du sol sur ses propriétés physiques, et qu'il existe très peu d'informations sur les effets liées aux combinaisons de pratiques agricoles (Alletto and Bustillo, 2023).

D'après Lionel Alletto, un des inconvénients de l'AC est qu'elle est la plupart du temps associée à un usage important de pesticides (le glyphosate notamment, pour détruire les cultures intermédiaires). Une certaine flexibilité sur le critère de non travail du sol, tolérant un travail léger, permet de s'affranchir de l'usage de pesticides. De ce compromis entre agriculture de conservation et agriculture biologique résulte une « agriculture biologique de conservation » (ABC), proche de la notion d'« agriculture régénératrice » ou « régénérative » diffusée par

¹ <https://eau-grandsudouest.fr/agenda/restitution-projet-bag-ages>

² <https://www.inrae.fr/actualites/quest-ce-que-lagroecologie-letude-bagages-capsules-video>

certaines chercheurs (l'université de Wageningen par exemple (Giller *et al.*, 2021)) et de plus en plus utilisée dans des travaux scientifiques¹.

Ces mêmes principes peuvent être appliqués en contexte forestier à travers des pratiques forestières limitant la compaction des sols, en évitant par exemple le recours aux engins lourds (c'est une des mesures étudiées dans le schéma stratégique du bassin de la Vesdre²).

Par ailleurs, aux dires des experts interrogés (Lionel Alletto, Olivier Hébrard), un autre point d'incertitude concerne les effets de l'augmentation de la matière organique dans le sol (par des apports externes, de couverts, etc.) sur ses capacités de rétention. Ces effets ne suivent pas de tendance claire.

Agroforesterie / Agroforestry

Cette pratique fait partie de la diversification végétale promue par l'agriculture de conservation. On choisit cependant de la catégoriser à part, du fait de sa grande diversité interne et du rôle particulier attribué aux arbres dans les systèmes agroforestiers.

Il s'agit d'associer sur la même parcelle ou exploitation, des arbres à un autre système de production : maraichage, viticulture, grandes cultures, élevage. Bien qu'elle ait fait l'objet de plusieurs rapports ministériels et plans de développement depuis 2015³, cette pratique est encore faiblement diffusée en France. La surface couverte est assez mal évaluée, elle aurait représenté environ 1 million d'hectares en 2015 (source : Solagro)⁴. La traduction la plus répandue de cette pratique est la (re)-plantation de haies interparcellaires, recréant des paysages bocagés (cf. paragraphe plus loin).

Si la présence d'arbres sur le parcellaire peut apporter de nombreux avantages (ombre, brise-vent, limitation de l'érosion éolienne, support de biodiversité, stockage du carbone, intérêt paysager)⁵, leurs effets sur la disponibilité de l'eau pour les cultures associées restent débattus. Les points plus incertains concernent les effets sur l'infiltration profonde, la disponibilité de l'eau pour les cultures, et le bilan hydrique global.

De nombreuses publications tentent d'apporter des éléments de connaissance sur les processus impactés (Zhu *et al.*, 2020). La partie aérienne des arbres permet, sous réserve d'une densité optimale, d'intercepter les précipitations, de réduire la quantité d'eau atteignant le sol et de diminuer sa capacité érosive ; également de fournir de l'ombre et ainsi de réduire l'évaporation de l'humidité du sol. Les obstacles aux sols (couvert de surface) que constituent les arbres peuvent réduire le ruissellement de surface (volume et vitesse), la compaction et l'érosion du sol. Enfin, les arbres développent un réseau racinaire profond, qui améliore la porosité, et peut ainsi favoriser l'infiltration (Zhu *et al.*, 2020).

Un rôle bénéfique joué par le réseau racinaire de l'arbre serait de prospecter les réserves d'eau plus profondes (non accessibles pour les cultures arables), mais aussi d'activer des mécanismes de redistribution de l'eau le long des racines (augmentant potentiellement l'humidité

¹ Une recherche dans WoS avec le terme « regenerative agriculture » donne 430 résultats, avec des publications depuis 2016, et beaucoup plus depuis 2022.

² https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/314437/2/MODREC%20Note%20aux%20D%C3%A9cideurs_Vfinal.pdf

³ <https://agriculture.gouv.fr/lagroforesterie-en-france>

⁴ <https://agriculture.gouv.fr/evaluation-du-plan-de-developpement-de-lagroforesterie-2015-2020>

⁵ <https://www.agroforesterie.fr/la-haie-agricole/>

de la surface et l'eau disponible pour les cultures) : ce processus est connu sous le nom d'« ascenseur hydraulique » (Bayala and Prieto, 2020; Grossiord, 2020).

D'autre part, la présence d'arbres conduit à augmenter l'évapotranspiration (forte demande en eau), induisant potentiellement une compétition avec les cultures (Zhu *et al.*, 2020). Ces effets doivent être considérés à la fois pour les cultures et pour la quantité d'eau disponible pour l'aval du bassin-versant.

La prédominance des différents effets hydrologique, augmentant ou réduisant au final la disponibilité de l'eau pour les cultures, et la quantité d'eau dans le reste du BV, semble beaucoup dépendre du type de sol, de sa profondeur, sa réserve utile, des espèces d'arbres, etc. D'après Lionel Alletto, des recherches sont en cours pour tenter d'éclaircir les effets de la plantation d'arbres au sein de parcelles et de préciser le bilan hydrique du système dans des conditions pédoclimatiques variées. Dans tous les cas, la plantation d'arbres implique également un besoin en eau important sur les premières années.

Un autre point à éclaircir est l'effet des micro-organismes associés aux racines, en particulier les mycorhizes (réseaux de champignons reliés aux racines des végétaux), sur la prospection et l'utilisation de l'eau en conditions de sécheresses (Molénat *et al.*, 2023). Des publications montrent en effet que les mycorhizes et résidus produits par les racines peuvent augmenter la porosité du sol, sa capacité de rétention d'eau, et sa conductivité hydraulique (Zhu *et al.*, 2020).

Selon les membres de Permalab interrogés, l'agroforesterie est centrale dans l'approche de l'hydrologie régénérative. Les rôles multiples des arbres sont avancés : régulateur du microclimat, infiltration par les racines, développement du réseau mycorhizien. Ils estiment la connaissance scientifique comme suffisamment établie sur le rôle des arbres, bien qu'elle nécessite d'être étayée davantage, notamment en multipliant les contextes d'étude.

Drainage contrôlé ou adapté / Controlled or adapted drainage

Le drainage des sols agricoles a été largement utilisé pour gérer les excès d'eau en les exportant en dehors de la parcelle (par des tuyaux enterrés notamment). Il est maintenant découragé, occasionnant une dégradation accélérée des sols. Le drainage profond en particulier, peut abaisser le niveau de la nappe et fragiliser des milieux humides. Le drainage « contrôlé » ou « adapté » est considéré comme une mesure naturelle de rétention d'eau (MNRE)¹ : il augmente la rétention de l'eau dans le profil de sol par rapport à un drainage classique (Carluer *et al.*, 2022).

Les tuyaux de drainage peuvent par exemple être bouchés en période estivale ou de sécheresse, et les eaux de drainage récupérées le reste du temps peuvent être redirigées vers des mares, étangs, ou zones humides. Ce stockage temporaire peut également permettre de transformer les nitrates, dégrader certains pesticides et ainsi réduire la contamination des eaux de surface.

Les chemins et exploitations forestières sont également parfois drainés (via un réseau de fossés par exemple) ; des approches similaires d'adaptation du drainage peuvent s'y appliquer.

¹ <https://www.nwrm.eu/measure/controlled-drainage>

Tracé approprié des chemins et des routes / Appropriate layout of paths and roads

C'est une des mesures listées dans le catalogue européen des « mesures naturelles de rétention d'eau », citant une étude des effets des routes forestières sur la réponse hydrologique d'un bassin en Grèce (Soulis, Dercas and Papadaki, 2015)). En effet, la disposition des routes peut favoriser ou au contraire atténuer le ruissellement et l'érosion.

Le design approprié des routes et chemins d'accès dans une exploitation agricole est également mis en avant par des théoriciens et praticiens de la permaculture (il est par exemple pris en compte dans l'« échelle de permanence » proposée par P.A. Yeomans, reprise dans les formations du bureau d'étude Permalab). L'optimum serait que ces chemins soient conçus avec les plus faibles pentes possibles.

La restauration, préservation, et création de milieux naturels ou semi-naturels

Prairies, haies et autres « infrastructures agroécologiques » / Meadows, hedgerows and other agroecological infrastructures

Le terme « infrastructures agroécologiques » (IAE) désigne des éléments du paysage agricole à priori non productifs, des milieux semi-naturels reconnus pour leurs « services écosystémiques ». Ce sont des éléments faisant partie du paysage agricole (haies, prairies, paysages de bocages), mais qui ont reculé en France afin de simplifier le parcellaire et favoriser par exemple l'extension de champs de grandes cultures (notamment lors des opérations de remembrement¹ dans les années 1950 à 80) ; et qui continuent d'être retirés du paysage.

Ces éléments ont été largement étudiés et en premier lieu (re)mis en avant pour leurs fonctions de rétention des contaminants agricoles (pesticides, nitrates, etc.) afin de préserver la qualité des eaux de surface et souterraines (CORPEN/Groupe Zones tampons, 2007; Carluet *et al.*, 2017; Tournebize *et al.*, 2024). Ils sont considérés comme des « zones tampons », capables d'intercepter le ruissellement, les flux drainés et les pollutions associées. Les contaminants peuvent être filtrés par ces milieux et retenus aux abords de la parcelle, où ils peuvent subir des processus de décomposition ou transformation chimique et biologique. Ces « services écosystémiques » peuvent être également envisagés sous un angle quantitatif, via l'infiltration et la rétention des eaux de ruissellement. Ces IAE ont aussi un intérêt pour la biodiversité, pour les auxiliaires de culture et le maintien de la trame verte et bleue.

Les **haies** sont une unité de végétation ligneuse, qui souvent délimitent et encadrent les parcelles, mais qui peuvent également être implantées à l'intérieur de parcelles. Elles ont de multiples fonctions : supports de biodiversité, brise-vent, ombre, délimitation du parcellaire, etc. S'agissant des écoulements d'eau, les haies peuvent ralentir le ruissellement, en particulier si elles sont positionnées perpendiculairement à la pente et disposées sur un talus ; et favoriser l'infiltration grâce au décompactage du sol et à la profondeur racinaire (cf. partie sur l'agroforesterie). Elles sont également efficaces contre l'érosion des sols, et peuvent être placées stratégiquement dans les zones de ruissellement concentré (en fond de talweg par exemple).

Aurore Degré et son équipe de recherche à l'université de Liège a étudié les haies en tant que freins hydrauliques au ruissellement. Pour quantifier leur efficacité, cette équipe a instrumenté des zones plantées de haies d'âges variés, avec des pentes et des débits variés. Selon elle,

¹ <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/remembrement>

l'obtention de résultats dépend principalement de l'acquisition d'observations quantifiées fiables et du choix d'une diversité de sites d'études.

Des **bandes enherbées** peuvent être placées en contours des parcelles, ou entre des cultures, avec souvent comme but premier de retenir des contaminants et particules de sol érodées. Par rapport à un sol nu, elles favorisent également l'infiltration dans le sol.

Enfin, d'après plusieurs études, la mise en place de **prairies** augmente la capacité de recharge par rapport aux terres cultivées ou à la forêt, en contexte de faible pente (Selles *et al.*, 2023). D'après les références étudiées par Adrien Selles dans le cadre du projet SFN-ESO, au-delà d'une pente de 20 % cependant, les résultats sur la recharge deviennent négligeables à cause de l'augmentation du ruissellement par rapport aux cultures et aux forêts.

Forêts / Forests

La reforestation ou le boisement¹ sont largement mis en avant pour augmenter le stockage naturel du carbone. Le (re)boisement peut avoir de nombreux autres effets positifs, par exemple en termes d'habitat pour la biodiversité, d'amélioration de la qualité de l'eau par filtration des contaminants, d'utilisation de la ressource en bois, etc.

Concernant les aspects de quantité d'eau, les effets des forêts (ou spécifiquement d'actions de déforestation, de boisement ou de reforestation) sur le régime hydrologique ne sont pas pleinement établis malgré de nombreuses études. Ils font l'objet de débats scientifiques, certains auteurs défendant le rôle positif des forêts sur la régulation du climat et de l'hydrologie (Ellison *et al.*, 2017) (Neary, Ice and Jackson, 2009), tandis que d'autres se montrent plus critiques de cet engouement, qui d'après eux mêle des questions non résolues à des perceptions publiques parfois erronées (Andréassian, 2004) (van Meerveld and Seibert, 2024) (Douville *et al.*, 2024).

Par exemple, les sols forestiers sont souvent vus comme des « éponges », c'est-à-dire comme ayant la capacité de retenir et stocker l'eau dans le sol pour la diffuser lentement et fournir un débit de base. Ce potentiel fonctionnement « éponge » des sols forestiers a été longuement débattu et semble dépendre fortement du régime de précipitation (plus ou moins intense), du type de sol (plus ou moins infiltrant), et de l'hydrogéologie (le débit des sources pendant les périodes sèches dépendant plus de la recharge des aquifères et de leur drainage que de la végétation) (van Meerveld and Seibert, 2024).

Les effets de la présence d'arbres sur l'interception des précipitations, le ralentissement du ruissellement, l'augmentation de l'infiltration et l'augmentation de l'évapotranspiration, sont assez bien établis (présentés dans le paragraphe sur l'agroforesterie). Néanmoins, le passage d'échelle de l'arbre à la forêt soulève des questions sur ses potentiels effets sur les débits d'étiage, sur la recharge des nappes, sur les conséquences de sécheresses météorologiques ou de précipitations extrêmes, voire sur le climat.

Premièrement, l'effet de la forêt sur les débits d'étiage et la recharge des nappes est variable et reste mal établi. Il est assez bien établi que l'infiltration est plus importante dans les sols forestiers qu'avec d'autres types de végétation (Neary, Ice and Jackson, 2009). Seulement, selon le climat du site et l'espèce d'arbres (notamment leur profondeur racinaire), la part plus importante d'eau infiltrée peut augmenter la recharge et donc soutenir les faibles débits pendant les périodes

¹ On fait la distinction suivante entre reforestation et boisement (en anglais afforestation) : la reforestation qualifie l'action de planter des arbres indigènes là où ils auraient existé (ou permettre leur repousse naturelle), alors que le boisement désigne la plantation d'arbres à un endroit où l'espèce n'aurait pas été présente naturellement (utilisation d'espèces non indigènes, ou sur des terres sur lesquelles la forêt n'était pas présente par le passé) (WWAP / ONU-Eau, 2018)

sèches ; ou bien la transpiration accrue des arbres peut compenser voire dépasser l'augmentation de l'infiltration, et mener finalement à des débits plus faibles (Selles *et al.*, 2023). D'après Selles *et al.* (2023), il semble y avoir un consensus sur l'effet positif des forêts sur la recharge et les bas débits dans les climats humides, mais les résultats sont plus contrastés dans les climats tempérés. D'après la revue de littérature réalisée par Lalonde *et al.* (2024) (cf. annexe 8.3), la majorité des cas étudiés rapportent une augmentation de la sévérité des sécheresses après (re)boisement, bien que certains cas rapportent une diminution et d'autres aucun effet significatif. Dans le cas spécifique de plantations d'arbres non indigènes invasifs, celles-ci peuvent provoquer un assèchement et affecter les débits d'étiages. La coupe de ces arbres s'avère alors favorable aux débits d'étiages (Holden *et al.*, 2022).

En revanche, les travaux étudiant les effets du boisement d'un bassin dans différentes conditions climatiques et géographiques s'accordent sur une réduction du nombre de crues ainsi que le retard et l'atténuation du pic de crue (Lalonde *et al.*, 2024).

D'autres effets sont mis en évidence dans la littérature, sans toutefois avoir encore été vérifiés empiriquement. C'est en particulier le cas s'agissant de la contribution des arbres et des forêts aux précipitations locales et à la circulation atmosphérique (Ellison *et al.*, 2017). Une théorie controversée des physiciens Makarieva et Gorshkov présente les forêts comme une « pompe biotique ». Selon eux, dans les climats tempérés, un couvert forestier continu à partir des côtes faciliterait et maintiendrait le transport de la vapeur d'eau et donc des précipitations vers l'intérieur des continents. D'autres scientifiques avancent le rôle de particules biologiques libérées par les arbres dans la condensation des nuages et l'intensification des précipitations (jouant un rôle de « bio-condensateurs ») (Morris *et al.*, 2014; Morris, 2018).

Toutes les personnes interrogées ont exprimé de la prudence sur les effets de la végétation et des forêts sur le climat et les précipitations (sans être elles-mêmes expertes spécifiquement de ce sujet) ; considérant que les connaissances à ce sujet ne sont pas stabilisées et que c'est une question ouverte à approfondir. Certaines mettent en garde vis-à-vis des risques de généralisation, d'extrapolation ou d'exagération des effets hydrologiques de la revégétalisation.

A titre d'exemple, le conseil scientifique de l'Agence de l'eau Adour-Garonne précise dans sa note de positionnement sur l'HR : « *La déforestation sur de vastes zones peut également réduire directement l'humidité du sol, l'évaporation et les précipitations au niveau local, mais aussi entraîner des changements de température au niveau régional qui affectent le régime des précipitations. A partir d'une comparaison empirique de pluviomètres appariés, des travaux ont montré que les précipitations sont effectivement plus élevées en moyenne sur les zones de forêts. La différence est de l'ordre de 0.1 mm/j soit 40 mm/an en moyenne (pas de station en France). L'impact d'un scénario de reforestation en Europe a pu également être modélisé. Les résultats suggèrent qu'une reforestation massive de l'Europe (20 % de la surface) conduirait seulement à augmenter les précipitations en été entre 0.9 % et 14.3 % (Meier *et al.*, 2021). L'effet serait donc faible. De plus, il convient de prendre en compte le fait que les forêts évaporent davantage qu'une prairie par exemple et peuvent donc réduire localement la recharge des nappes. Le bilan hydrologique de la reforestation n'est donc pas forcément positif dans ces scénarios.* » (Conseil scientifique du comité de bassin Adour-Garonne, 2024)

Finalement, établir les effets des forêts et des actions de reforestation ou de déforestation sur le bilan hydrique d'un bassin et un cycle hydrologique plus globale est complexe, du fait de la multitude de processus et facteurs impliqués, de la difficulté à réaliser des « expériences » à grande échelle avec un état comparatif (suivi avant changement, et / ou un bassin témoin), et de la difficulté à intégrer l'occupation du sol dans les modèles hydrologiques et climatiques (cf. *partie 3.3*) (van Meerveld and Seibert, 2024). La difficulté à évaluer est d'autant plus importante pour

les actions de boisement et reforestation que celles-ci s'inscrivent sur un temps plus long qu'une déforestation (le temps de la pousse complète des arbres).

Zones humides et cours d'eau en têtes de bassin-versant / Wetlands and watershed headwaters

La restauration et la conservation de zones humides situées sur les têtes de bassin-versant contribuent également au ralentissement et à la conservation de l'eau, en agissant comme « zones tampons ». C'est également le cas de la restauration morphologique de petits cours d'eau, en les reconnectant à leur nappe d'accompagnement et en participant à l'hydratation des sols autour du cours d'eau.

Ces milieux et les mesures relatives à ceux-ci n'ont cependant pas été approfondis dans ce travail. C'est une des limites de cet exercice de synthèse, qui mériterait d'être poursuivi en ce sens.

La conception de petits aménagements pour ralentir et infiltrer l'eau de ruissellement

Infrastructures de « collecte de l'eau » ou « d'atténuation du ruissellement » / water harvesting infrastructures ou run-off attenuation features

Les infrastructures de collecte de l'eau, dont la terminologie anglophone, *water harvesting infrastructures* ou *rainwater harvesting* est plus répandue, désignent d'après l'UNESCO des « éléments bâtis qui interagissent avec des caractéristiques naturelles pour améliorer les services écosystémiques liés à l'eau » (définition WWAP) (Lalonde *et al.*, 2024). Ils peuvent également être désignés comme des systèmes ou techniques de conservation de l'eau et des sols. Ces infrastructures sont largement déployées dans l'agriculture pluviale méditerranéenne, dans des climats semi-arides et arides. Ces contextes agro-climatiques particuliers nécessitent d'optimiser l'utilisation de l'eau de ruissellement, en l'interceptant et en l'infiltrant localement dans les sols, pour la conserver au maximum et le plus longtemps possible dans la parcelle.

En Tunisie, un vaste programme national sur la « conservation des eaux et du sol » (CES) est mené depuis les années 1970 pour limiter l'érosion des sols agricoles et optimiser l'utilisation de l'eau, avec une direction ministérielle associée (la direction CES) depuis 1984. D'après Jérôme Molénat, ces aménagements sont issus de pratiques souvent traditionnelles, et de savoirs empiriques. Des travaux scientifiques étudient ces techniques pour caractériser et quantifier leurs effets, et également améliorer leurs conception et dimensionnement.

Ces infrastructures sont majoritairement utilisées dans des situations où la rareté des précipitations nécessite de retenir l'intégralité de l'eau reçue sur la parcelle ou le versant cultivé. Des ouvrages similaires (noues, fascines, etc.) sont pourtant aussi mis en place dans des situations où l'intensité et la fréquence des précipitations est plus importante, et où l'enjeu est plutôt de réduire le ruissellement et l'érosion. On parle alors plutôt d'éléments d'atténuation du ruissellement (*run-off attenuation features*) (par exemple dans le schéma stratégique d'aménagement du bassin de la Vesdre en Belgique¹) ; ou d'aménagements d'hydraulique douce (par exemple dans le nord de la France²).

¹ <https://territoire.wallonie.be/fr/page/inondations#schema-strategique-vesdre>

² https://www.trophees-adaptation-life-artisan.com/wp-content/uploads/2024/06/TROPHEE_LIFE_ARTISAN_FICHE_SAGE_NONETTE.pdf

Ci-dessous, quelques exemples d'infrastructures, et la description de leurs effets :

- **Des petits ouvrages de rétention d'eau**, par exemple des bassins de rétention (dépressions naturellement présentes ou créées par excavation), peuvent servir de zones d'infiltration des eaux de ruissellement. Des mini-barrages, souvent appelés « checkdams » ou redents, peuvent aussi être construits dans les fonds de talweg sec ou les fossés pour ralentir voire retenir les eaux de ruissellement. Ces barrières sont construites avec différents matériaux (pierres, terre, branchages, bois) et sont plus ou moins perméables (Figure 8). Les fascines, des barrières en bois parfois végétalisées, peuvent également entrer dans cette catégorie, même si celles-ci sont plutôt utilisées dans les versants avec pour objectif principal de retenir le sol et limiter l'érosion hydrique.

Selon les études revues par Lalonde *et al.* (2024), l'implémentation de ces micro-réservoirs (jusqu'à quelques centaines de m³) contribue à diminuer le ruissellement. La plupart des études montrent aussi une augmentation de l'infiltration, mais certaines témoignent d'une absence d'effet ; ces résultats variés peuvent être liés aux matériaux utilisés pour leur construction (roche, terre, etc.) et aux spécificités du sol. Néanmoins, les auteurs de cette revue soulignent des lacunes dans la compréhension des impacts de ces réservoirs sur le ruissellement et l'infiltration, ainsi que sur l'évaporation (Lalonde *et al.*, 2024).

Des ouvrages plus importants, comme des retenues collinaires allant jusqu'à quelques dizaines voire centaines de milliers de m³, servent à capter les eaux de ruissellement, à les stocker, et à fournir de l'eau aux parcelles irriguées et/ou remplir les aquifères peu profonds (selon leur perméabilité), augmentant ainsi la disponibilité de l'eau pour les cultures (Molénat *et al.*, 2023). Il est cependant important de considérer l'impact potentiel de ces retenues et de leur multiplication sur un bassin versant (notamment sur l'alimentation des cours d'eau en aval) : une revue de littérature publiée dans Science of the Total Environment traite par exemple des impacts cumulés des petits réservoirs (moins de 1 millions de m³) sur l'hydrologie (Habets *et al.*, 2018).



Figure 8 - Photographies de checkdams en bois et en pierre installés dans les talwegs, et d'une fascine végétalisée dans un versant (en haut à droite) (source des images : © Permalab)

- **Des fossés d'infiltration, ou canaux de conservation**, sont des excavations réalisées sur les pentes le long des courbes de niveau pour arrêter et répartir le ruissellement des eaux de pluie, et favoriser leur infiltration (définition issue de Lalonde *et al.* (2024),

complétée par des précisions du bureau d'étude Permalab). Ce sont des fossés plus ou moins larges et profonds, dotés de talus plus ou moins compactés ; l'ensemble est parfois appelé « baissière », « noue », ou « *swale* » en anglais (cf. Figure 9). Des arbres peuvent être plantés en aval du canal, sur un talus, afin de bénéficier de l'eau infiltrée. Ces canaux sont utilisés dans certaines régions depuis plusieurs siècles : dans la Sierra Nevada, les « acequias de careo », de longs canaux d'infiltration, servent à recharger l'aquifère depuis le 8^e ou 10^e siècle (Jodar *et al.*, 2022).

Une majorité des publications identifiées par Lalonde et ses co-auteurs (dont une revue de littérature, quatre articles portant sur des observations mesurées et cinq articles portant sur des modélisations) montrent une réduction du ruissellement (jusqu'à une diminution de 50% selon Locatelli *et al.* (2015)). Trois autres articles en revanche montrent une absence d'effets vis-à-vis du ruissellement (Lalonde *et al.*, 2024). Elles avancent presque toutes une augmentation de l'infiltration, à la fois en volume et en proportion, bien que Locatelli *et al.* (2015) souligne un manque de connaissance sur ce point. Ces effets dépendent de la topologie du site et des conditions pédoclimatiques. La végétalisation des fossés peut améliorer leurs capacités de rétention des sédiments et de régulation des flux d'eau (Rudi *et al.*, 2020).

- **Les canaux de dérivation** sont des canaux transportant les eaux de ruissellement avec une faible pente à travers un versant (à la différence des canaux de conservation qui sont horizontaux), pour améliorer l'infiltration le long du canal et alimenter des zones d'infiltration (définition issue de Lalonde *et al.* (2024), complétée par des précisions du bureau d'étude Permalab).

Peu d'études évaluant les effets des canaux de dérivation ont été identifiées par Lalonde et ses co-auteurs, et la plupart de celles identifiées se situent dans les Andes péruviennes. Bien que deux études fassent état d'une diminution du ruissellement et d'une augmentation de l'infiltration, il ne semble pas exister de résultats clairs chiffrés concernant ces effets hydrologiques (Lalonde *et al.*, 2024).

- **Les terrasses** consistent en une « surface inclinée découpée en couches plates par des murs verticaux ou obliques généralement faits de pierres » (définition issue de WWAP / ONU-Eau, 2018). C'est un mode traditionnel d'agriculture méditerranéenne et d'autres régions, permettant notamment de limiter l'érosion et de favoriser la formation de couches de matière organique (Carluer *et al.*, 2022).

Trois revues de littérature identifiées par Lalonde *et al.* (2024) avancent une atténuation du ruissellement. Les effets sur l'infiltration semblent en revanche dépendre de la culture, de la disposition des terrasses et de l'endroit où est réalisée la mesure.



(a) Zones d'infiltration aménagées en juin 2023, Andalousie, Espagne © Permalab.



(b) Baissières végétalisées aménagées en septembre 2023, Drôme, France © Permalab.

Figure 9 - Photographies d'une baissière remplie d'eau de ruissellement (gauche) et d'autres aménagements réalisés dans des exploitations agricoles accompagnées par le bureau d'étude Permalab (source des images : ©Permalab (gauche) et tirées de Eeckman et al. (2025) (droite))

Optimisation de la disposition des aménagements et des cultures / Contour farming

Les aménagements précédemment cités sont généralement stratégiquement disposés sur un versant : perpendiculairement à la pente, le long des lignes de contour topographiques, à l'intérieur des champs ou le long des bordures de champs, afin de retenir le ruissellement s'écoulant le long de la pente (Molénat *et al.*, 2023).

L'optimisation de cette disposition peut également s'appliquer au travail du sol, à la plantation des cultures, aux chemins d'accès, etc. Cette optimisation spatiale semble provenir de connaissances empiriques, et est encore peu approfondie dans la littérature scientifique.

Une technique plus spécifique encore, appelée « **keyline design** », a été initiée et diffusée par P.A. Yeomans dans les années 1950 en Australie (Yeomans, 1958). La spécificité du design en « *ligne clé* » est d'identifier des courbes de niveau spécifiques, passant par les points d'inflexion de la pente (les *keypoints*), permettant d'optimiser l'interception et la diffusion des eaux de ruissellement « *des creux vers les crêtes* ». La technique, bien que peu documentée dans la littérature scientifique, est utilisée à divers endroits dans le monde, parfois sur de grands espaces (Australie, États-Unis, Inde, Italie, Espagne, France). En France, plusieurs bureaux d'études de permaculture (Permalab par exemple) forment des agriculteurs à cette technique.

Dans le cadre de la modélisation du bassin versant de la Vesdre, un mémoire de master a porté sur la modélisation de *keyline* sur un petit bassin agricole (environ 1 km²) principalement composé de prairies. Les résultats de cette modélisation indiquent une réduction du ruissellement (Di Maggio, 2023).

Points d'attention sur la dépendance des effets aux conditions locales et sur le suivi des effets dans la durée

Ces différents types de mesures reposent sur les fonctions hydrologiques des milieux naturels et semi-naturels. Ainsi, leur efficacité dépend fortement des spécificités du milieu concerné. Des indicateurs peuvent permettre de caractériser ces spécificités climatiques, pédologiques, géologiques, agronomiques, hydrologiques et hydrogéologiques. Le tableau 2 en donne quelques exemples.

Cependant, les cas étudiés dans la littérature ne spécifient pas toujours toutes ces caractéristiques sur les sites d'observation. Un des enjeux pour pouvoir « généraliser » les effets d'une mesure est de pouvoir évaluer dans quelles conditions elle est efficace et quels facteurs y sont déterminants.

Tableau 2 - Exemples de facteurs, d'indicateurs et de sources de données possibles (source : autrice)

Facteurs influençant la circulation de l'eau et l'efficacité des mesures de ralentissement et conservation de l'eau	Indicateurs possibles	Sources de données sur le territoire français
Les conditions hydro-climatiques : le type de climat (méditerranéen, océanique, continental, etc.), les conditions climatiques locales (précipitations, température) et le régime hydrologique (pluvial, nival, etc.)	Cumul annuel de précipitations, données statistiques sur les précipitations, sur la température moyenne annuelle, etc. Données statistiques sur les débits, débit moyen mensuel, etc.	Météofrance, Hydroportail, DRIAS (climat et hydrologie futurs)
La topographie et l'occupation du sol	Pente, exposition au soleil et au vent, reliefs, etc. Type d'occupation du sol	IGN, MNT à 1 ou 5m CORINE Land Cover
Les caractéristiques physiques du sol : capacité de stockage, d'infiltration, etc.	Profondeur du sol, granulométrie, porosité totale, distribution de la taille des pores, niveau d'humidité du sol, masse volumique apparente, etc. L'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR), mis en œuvre à l'échelle nationale par le BRGM, qui qualifie l'aptitude des terrains à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de surface ¹ .	Données IGCS sur GisSoil. ; <i>Mesures locales</i> Disponible sur InfoTerre
La géologie et l'hydrogéologie : les perméabilités, transmissivités,	Couches rocheuses, disposition, structure, type de roches,	Cartes géologiques disponibles sur InfoTerre (Bd

¹ <https://infoterre.brgm.fr/actualites/territoires-favorables-linfiltration-eaux-infoterre-grace-lidpr>

L'IDPR est calculé à partir de la BD CARTHAGE® pour la prise en compte du réseau hydrologique naturel (état et type d'écoulements, nature des axes hydrographiques) et du MNT pour définir le réseau théorique des écoulements par l'analyse des talwegs. Sur le principe que l'organisation du [réseau hydrographique](#) est dépendante des formations géologiques (lithologie, structure) qui le supportent, la densité de drainage est révélatrice des formations et permet la substitution des données liées à la [perméabilité](#) des sols et sous-sol. La cartographie IDPR est accessible sur l'[Espace cartographique](#), à l'échelle 1/50 000.

etc. gouvernent le sens et la vitesse des écoulements souterrains	Epaisseur de la zone non saturée (ZNS), perméabilité, transmissivité Structure et niveau des nappes, piézométrie	Charm-50, Car-Hab, BSS, etc.) ADES (données sur les eaux souterraines) <i>Mesures locales</i>
---	---	---

La connaissance des conditions locales peut permettre de sélectionner, prioriser et d'adapter les mesures à mettre en œuvre. L'importance de la définition d'indicateurs ou d'ensembles d'indicateurs structurés pour l'accompagnement des acteurs a été abordée dans plusieurs entretiens.

Ces indicateurs et leur suivi (idéalement sur plusieurs années) sont également indispensables à l'évaluation des effets des mesures. Cela nécessite cependant un suivi avant et après la mise en place de la mesure, idéalement avec des points de mesure en amont et en aval de l'aménagement (ex : pour un suivi hydrogéologique de l'impact d'une SFN sur la recharge d'une nappe), voire un suivi témoin, pour pouvoir détecter les changements.

3.3. L'évaluation des effets hydrologiques à l'échelle d'un bassin versant

3.3.1. Pourquoi évaluer les effets à plus grande échelle ?

Dans les projets de recherche et les dynamiques territoriales associées aux approches visant à ralentir et conserver l'eau, le « passage à l'échelle » est un enjeu central, questionnant l'évaluation de l'efficacité de ces approches à l'échelle du bassin versant. C'est le cas de plusieurs projets de recherche récents ou en cours.

- De 2021 à 2023, le gouvernement wallon et ses partenaires ont travaillé sur un « schéma stratégique multidisciplinaire » du bassin de la Vesdre (superficie de 700 km²) suite aux inondations de juillet 2021, afin de coordonner une reconstruction résiliente et cohérente du territoire¹. Ce schéma intègre des mesures d'atténuation du ruissellement et de conservation de l'eau, via des pratiques culturelles et sylvicoles adaptées, la restauration de bocages et de tourbières, une diversification forestière, et des aménagements (de type noues) (cf. Figure 13). Une équipe de l'université de Liège Gembloux Agro-Bio Tech a accompagné ce projet pour en réaliser une modélisation hydrologique² (modélisation à base physique de trois sous-bassins pilotes d'une superficie d'environ moins de 50 km²) (voir encadré P46) (Convention MODREC-Vesdre, 2023).
- Le projet *Spongescapes* (2023-2024) propose une revue critique des fonctions « éponges » des paysages : il souligne notamment la nécessité d'un passage à l'échelle, des « mesures éponges » aux « paysages éponges » ; en identifiant un manque de connaissance et ciblant des priorités de recherche (Spongescapes consortium, in press).
- Dans cette perspective, le projet *Spongeworks*³ vise à mettre en œuvre des « mesures éponges » à grande échelle et étudier leurs effets sur trois sites pilotes contrastés (en France sur le bassin-versant de la Lèze de 350 km², et deux autres bassins en Grèce et en Allemagne).
- A la suite du projet de recherche BAG'AGES⁴ (cf. partie 3.2), le projet BAGHEERA⁵ cherchera notamment à modéliser et évaluer le fonctionnement agro-hydrologique de bassins versants (~10-100 km²) en Adour-Garonne, en prenant en considération des stratégies d'agroécologisation.
- Enfin, les porteurs de l'hydrologie régénérative ambitionnent également ce changement d'échelle (entretien avec Simon Ricard). Le projet d'étude et de mise en œuvre d'un plan d'aménagement suivant les principes de l'HR sur le bassin du Bost (20 km²) dans la Drôme, s'inscrit dans cette perspective.

Que peut vouloir dire « passer à grande échelle » ?

Par changement d'échelle, on peut entendre différentes perspectives, chacune visant à relever différents défis.

¹ <https://territoire.wallonie.be/fr/page/inondations#schema-strategique-vesdre> ; <https://www.verviers.be/actualites/2023/rapport-final-du-schema-strategique-multidisciplinaire-du-bassin-versant-de-la-vesdre>

² https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/314437/2/MODREC%20Note%20aux%20D%C3%A9cideurs_Vfinal.pdf

³ Spongeworks est un projet de recherche financé par l'union européenne, piloté par l'université de Hannovre et dont les partenaires en France sont le syndicat mixte de la vallée de la Lèze (SMIVAL), l'OiEau, le CNRS, les chambres d'agriculture d'Ariège et de Haute-Garonne, et le bureau d'études Addict Solutions <https://spongeworks.eu/>

⁴ Ce projet de recherche, financé par l'Agence de l'eau Adour-Garonne et terminé en 2021, visait à déterminer si les pratiques agroécologiques peuvent permettre de mieux gérer les flux d'eau et d'améliorer la qualité de l'eau <https://eau-grandsudouest.fr/agenda/restitution-projet-bag-ages>

⁵ <https://www.inrae.fr/actualites/impacts-lagroecologie-gestion-ressources-bassin-adour-garonne>

Tout d'abord, le changement d'échelle de l'évaluation des effets, peut signifier l'étude des effets d'une mesure locale à une plus grande échelle. On ne regarde pas seulement les effets localisés mais les effets sur le régime hydrologique du cours d'eau, ou sur les milieux à l'aval des mesures mises en œuvre.

Cependant, si la mesure mise en place ne couvre qu'une faible partie du bassin, il y a peu de chance d'observer un effet significatif. Ce point est souligné dans plusieurs entretiens : Clément Fabre évoque la possibilité de ne pas pouvoir observer d'effets significatifs sur le ruissellement en aval dans le projet *Spongeworks* sur la Lèze si la surface couverte par les mesures (haies, fascines, etc.) est trop faible et le point de mesure trop en aval. Charles Perrin souligne aussi le fait que des changements sur des parcelles de quelques hectares pourront avoir un effet visible sur de tout petits bassins amont, mais deviendront souvent invisibles dès lors que l'on se place à des échelles plus grandes (par ex. de quelques km² ou plus).

Cependant, « passer à grande échelle » semble signifier surtout, **le changement d'échelle dans la mise en œuvre des mesures, suivant deux logiques :**

- 1) Multiplier la surface couverte par un type de mesure** (par exemple, convertir toute la surface cultivée d'un bassin en agriculture de conservation ; ou reboiser une grande surface) : Cela soulève des questions de « seuil » de densité de mesure ou de surface couverte pour observer des effets significatifs à grande échelle.
- 2) Concevoir une combinaison de mesures pertinente et optimisée sur un bassin**, selon son fonctionnement hydrologique.

L'importance de la composition et la configuration des cultures et aménagements est par exemple soulignée par Molénat *et al.* (2023) pour l'agriculture méditerranéenne. Un des leviers de gestion est de raisonner la répartition spatiale et temporelle des cultures en fonction de la variabilité spatiale et temporelle de l'humidité des sols (donc de la disponibilité en eau pour les plantes) et des flux d'eau associés. Les membres de Permalab interrogés soulignent que dans l'approche de l'HR, la manière de « *designer* » l'aménagement du paysage « *selon les chemins de l'eau* » importe davantage que la multiplication d'infrastructures. Ils insistent sur l'intérêt d'appréhender d'emblée le fonctionnement hydrologique global des versants (Figure 10). C'est aussi, d'après Benoît Fribourg-Blanc, l'objectif principal du projet européen *OPTAIN*, qui a réalisé des modélisations de combinaisons de trois à six types de mesures sur quatorze études de cas, à l'échelle de petits bassins versants agricoles.

Ce point soulève plusieurs questions : **quelles combinaisons de mesure sont pertinentes, pour quels enjeux ? Quelle amplitude d'effet peut être attendue ? Y-a-t-il des rétroactions possibles entre mesures qui limiteraient ou amplifieraient les effets ?**

Une hypothèse proposée par Judith Eeckman et ses co-auteurs dans un article publié récemment dans *Dynamiques environnementales*¹, suggère l'existence potentiel de rétroactions positives entre les changements de circulation de l'eau et la modification des états de surface et de subsurface, encore très peu étudiées dans la littérature (Eeckman *et al.*, 2025).

¹ Article portant sur l'évaluation des impacts des Plan Territoriaux de Régénération des Cycles de l'Eau (évaluation dont est chargée l'association PUHR)

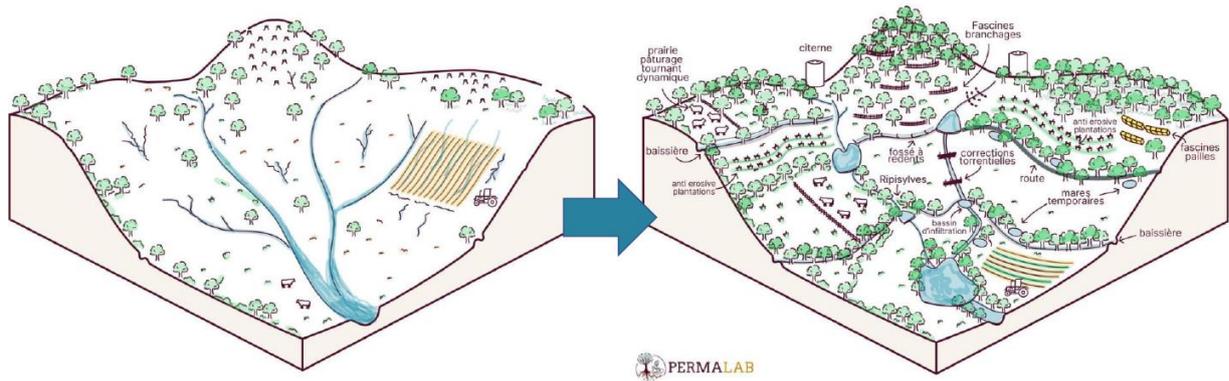


Figure 10 - Schématisation de l'approche de l'hydrologie régénérative sur un petit bassin versant agricole (Source : © Permalab)

Quels enjeux sont ciblés à l'échelle d'un bassin versant ?

A l'échelle d'un bassin versant, ce n'est pas seulement la disponibilité de l'eau ou le maintien du sol sur une parcelle agricole qui peut être visé, mais aussi un effet concret et visible sur le régime hydrologique, sur la protection des populations, des usages de l'eau, et la préservation des écosystèmes.

Dans tous les cas, les approches visant à ralentir et conserver l'eau dans les têtes de bassin versant suivent une logique d'action en amont pour mieux gérer une situation critique à l'aval :

- Ralentir et infiltrer le ruissellement dès l'amont lors d'épisodes pluvieux intenses pour atténuer leurs impacts (érosion, coulées de boue, inondations) ;
- Retenir plus longtemps l'eau dans le sol en tête de bassin versant pour l'infiltrer, recharger les nappes, alimenter les cours d'eau et les écosystèmes associés en période de sécheresse météorologique.

Ces approches constituent un changement de paradigme par rapport à ce qui prévaut depuis plusieurs décennies (construire des ouvrages de génie civil pour stocker l'eau, ou la ralentir quand elle est trop abondante).

Les approches récemment développées (celle de l'hydrologie régénérative, ou des « paysages éponges »¹) défendent de traiter conjointement les deux types d'aléas hydrométéorologiques, secs et humides. Cependant, il peut exister à la fois des synergies et des antagonismes entre ces effets. Par exemple, une densification de la végétation peut être efficace pour l'atténuation des impacts d'une précipitation intense, mais augmenter les conséquences néfastes d'une sécheresse sur les cours d'eau par une augmentation de l'évapotranspiration. Une recherche de compromis entre différents enjeux est parfois nécessaire.

Les effets peuvent être mesurés ou estimés différemment selon les enjeux ciblés, plus ou moins facilement, et sur différentes échelles de temps. Un épisode pluvieux intense peut être très court mais mobiliser d'importants volumes d'eau et induire des processus se déroulant essentiellement en surface (ruissellement, érosion, transport de matière associée), alors qu'une sécheresse prolongée implique de faibles volumes d'eau, un temps long, et d'autres processus mobilisant également le sol, voire la nappe (évapotranspiration, infiltration, résurgence). L'enjeu ciblé conditionne donc la stratégie d'évaluation (type de modèle, de suivi, etc.).

¹ <https://www.spongescapes.eu/> <https://spongeworks.eu/>

Quelles preuves existe-t-il de l'efficacité à « grande échelle » ?

Il y a peu de « preuves » de l'efficacité de ces approches à « grande échelle » (à partir d'une dizaine de km²). Peu d'exemples d'expérimentation existent et aucun de ce exemple ne semble avoir fait l'objet d'un suivi quantitatif. Notamment, peu de chercheurs se sont intéressés en France aux SFN dans une perspective de préservation des eaux souterraines, et il y a peu de projets évalués à l'échelle d'un aquifère si ce n'est aucun (entretien avec Adrien Selles).

Les auteurs d'une revue de littérature sur les preuves scientifiques des impacts hydrologiques des SFN insistent sur le fait que ces preuves restent faibles, du fait du manque d'observation et de connaissance des processus ; et qu'il existe un risque que les interventions ne mènent pas aux effets attendus (Lalonde *et al.*, 2024). L'évaluation des effets hydrologiques nécessite selon eux des outils de modélisation robustes capables de gérer les incertitudes induites par le manque de connaissance et de données, en particulier pour des simulations réalisées avant la mise en œuvre des projets de SFN (modélisations ex-ante).

3.3.2. Comment évaluer les effets à grande échelle ? Les approches de modélisation numérique, leur potentiel et leurs limites

Les modèles numériques peuvent s'avérer utiles pour étudier les processus hydrologiques à petite échelle, mais ils deviennent nécessaires voire indispensables à plus grande échelle.

Les différents types de modèles numériques

Les modèles principalement utiles pour évaluer les effets des mesures de ralentissement et de conservation de l'eau sont les **modèles hydrologiques** : ils permettent d'établir le lien entre des entrées climatiques (séries temporelles de pluie, température) et une sortie hydrologique (séries temporelles du débit à l'exutoire) sur un bassin versant, selon ses caractéristiques physiques (cf. illustration simplifiée en Figure 11). Ils représentent de manière plus ou moins détaillée les processus physiques entre ces entrées climatiques et ces sorties.

On distingue deux approches de modélisation : **les modèles conceptuels et les modèles à base physique**. Une troisième approche, la modélisation empirique, ne sera pas abordée ici, car elle ne décrit pas suffisamment les processus impliqués pour l'étude d'aménagements de surface. Les modèles empiriques, assimilés à des « boîtes noires », sont construits autour de relations mathématiques directes entre variables d'entrée et variables de sortie (précipitations et débits généralement). Ces modèles simples peuvent toutefois être utiles pour de la détection d'impact, dans le cas où l'on dispose de mesures complètes avant et après aménagement.

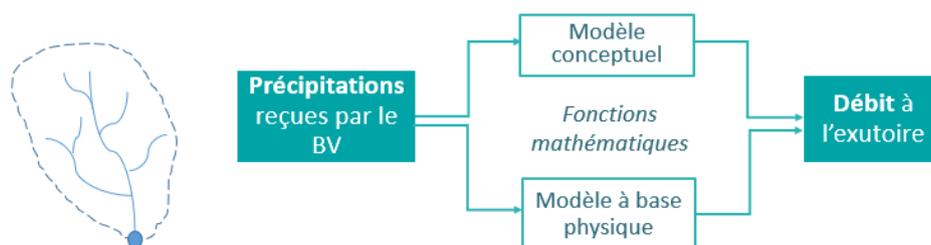


Figure 11 - Représentation schématique simplifiée de la modélisation hydrologique d'un bassin versant (source : autrice)

Pour chaque approche de modélisation, les manières de représenter l'espace et leur niveau de détails permettent de distinguer :

- Les **modèles globaux** quand le bassin est traité comme une seule entité homogène,
- Les **modèles semi-distribués** lorsque les processus sont représentés par sous-entités assimilées à un ensemble homogène (par sous bassins, par bandes d'altitudes...),
- Les **modèles distribués** lorsque tout l'espace est discrétisé (par exemple avec un maillage régulier carré, triangulaire...).

La discrétisation temporelle varie également selon les modèles (pas de temps horaire, journalier, mensuel, etc.).

De nombreux critères peuvent intervenir dans le choix d'un modèle : sa structure, la fidélité avec laquelle il représente les processus hydrologiques fondamentaux, sa robustesse, sa rapidité d'exécution, sa demande de données initiales, son accessibilité, gratuité, etc.

Les modèles hydrologiques conceptuels

Les modèles conceptuels représentent le fonctionnement d'un bassin hydrologique et la relation pluie-débit sans utiliser les lois physiques associées aux processus concernés. Ils sont généralement constitués de modules dits de « réservoirs » connectés entre eux, dont les niveaux de remplissage varient au cours du temps. Ces réservoirs représentent les différents compartiments hydrologiques du bassin-versant modélisé. Le modèle se décompose en plusieurs fonctions mathématiques, dont les paramètres sont ajustés lors d'une étape indispensable de calage à partir des données observées afin de reproduire au mieux la relation pluie-débit.

Ce type de modèle est particulièrement utile pour les modélisations à une échelle importante. Il demande assez peu de données caractéristiques du système étudié (chroniques longues de pluie, température, débits principalement), mais des chroniques longues et fiables pour garantir une bonne calibration. Il est moins adapté cependant à l'étude de l'impact de l'aménagement de surface sur les circulations d'eau, car l'occupation du sol et a fortiori les éléments du paysage sont difficilement représentés explicitement par ses paramètres. La modélisation conceptuelle peut permettre d'identifier des ruptures statistiques dans les séries temporelles de précipitation et de débits (démarche de détection d'impact), bien que selon Charles Perrin, elle ne donne pas de solutions complètement satisfaisantes s'agissant de la prédiction de changements de réponse du BV en lien avec des changements d'occupation des sols. Elle ne permet pas non plus d'attribuer précisément les effets simulés ou observés aux processus en jeu, ou de les différencier spatialement.

Les modèles hydrologiques à base physique

Les modèles à base physique représentent les processus fondamentaux hydrologiques par des équations physiques, avec plus ou moins de détail. Ils permettent de calculer les différents termes du bilan d'eau du bassin versant étudié. Dans ces modèles, un jeu de données (paramètres, variables) est associé à chaque maille spatiale. Ils peuvent être très détaillés spatialement mais demandent donc potentiellement beaucoup de données, un temps de calcul long et malgré tout une calibration souvent complexe, compte tenu du nombre de paramètres utilisés¹.

Une revue de littérature systématique des modèles utilisés pour évaluer l'efficacité des SFN contre les aléas naturels, avec leurs avantages et leurs limites a été publiée en 2021 dans Science

¹ En théorie, les modèles à base physique n'ont pas besoin de calibration (puisque basés sur les équations physiques représentant directement les processus fondamentaux hydrologiques). Dans les faits cependant, compte tenu de l'hétérogénéité sous maille, de la représentation imparfaite des processus, etc., il s'avère nécessaire de les calibrer.

of the Total Environment (Kumar et al., 2021) (cf. annexe 8.5). Cette revue cible principalement des modèles à base physique. Elle met en évidence que plusieurs modèles numériques sont capables d'évaluer la localisation optimale de SFN et leur efficacité contre les aléas hydrométéorologiques à l'échelle du bassin versant : **MIKE-SHE, MODFLOW, SWAT**, mais aussi VELMA, ACRU, SIMGRO, ParFlow-TREES, TELEMAC, et ADCIRC. Ces modèles sont en revanche très exigeants en données, et pourtant limités en termes de résolutions temporelle et spatiale. Ils ne peuvent pas simuler de manière détaillée la géométrie des SFN. D'autres modèles (comme SWMM, LISFLOODFP, etc.) sont plus flexibles et détaillés pour la représentation de l'espace et des SFN mais ne peuvent pas évaluer la planification et le design des SFN à grande échelle, intégrant mal les processus et les circulations de subsurface. Le choix du modèle demande donc un compromis. Une des pistes de recherche qu'identifient les auteurs est de développer des modèles à base physique qui seraient « multi-échelles » pour mieux appréhender l'efficacité des SFN à une plus grande échelle spatiale.

Le **modèle SWAT** est souvent mobilisé dans les projets d'accompagnement et de recherche sur les SFN ou les MNRE. C'est généralement une version plus récente du modèle, SWAT+, qui est utilisée, car elle représente mieux la connectivité des écoulements. Il est par exemple employé dans le projet *Spongeworks* sur le bassin du Lèze (d'après l'entretien avec Clément Fabre) et devrait être utilisé pour la modélisation du bassin du Bost (d'après l'entretien avec Judith Eeckman). Par ailleurs, le projet européen *OPTAIN*¹ vise à développer ce modèle et à faciliter son appropriation, sur ses sites d'étude et plus largement². Des modules particuliers (comme QSWAT+, ou bien SWATbuilR développé pour le projet *OPTAIN*) permettent de représenter plus précisément les unités paysagères et les structures (mares, obstacles, etc.). Selon Nadia Carluer, hydrologue à INRAE spécialisée en modélisation à base physique, SWAT reste cependant un modèle à réservoir pseudo-physique, pour lequel il n'est pas évident de faire le lien entre les caractéristiques mesurées sur le terrain et les paramètres du modèle.

D'autres limites des modèles à base physique sont soulignées par les experts interrogés. D'après Aurore Degré, les facteurs d'évolution des paramètres associée aux changements physiques sont souvent issus de la littérature par manque de données locales. Par ailleurs, d'après Charles Perrin, les modèles dits physiques restent aussi en partie conceptuels car limités par l'échelle de la maille et car tous les processus physiques ne sont pas représentés. Ces approches demandent de faire des hypothèses sur les processus dominants, et ces hypothèses nécessitent une validation qui n'est pas toujours réalisée. **L'étape de validation de la modélisation sur des données observées reste essentielle.**

Malgré tout, selon la synthèse collective de 230 scientifiques sur les problèmes non résolus en hydrologie (Blöschl *et al.*, 2019) (dont le problème de l'extrapolation des modèles à des conditions changeantes), la plupart des hydrologues seraient d'accord sur le fait que la modélisation d'un changement de végétation nécessite une approche davantage basée sur les processus que sur la calibration. Les modèles conceptuels basés sur la calibration seraient en effet moins capables d'extrapoler ce changement. De plus, il est possible d'améliorer la capacité d'un modèle à base physique à représenter le fonctionnement réel du bassin, en le calibrant sur des variables internes au modèle (et pas seulement sur le débit de sortie) (Rouzies, Lauvernet and Vidard, 2024). Dans tous les cas, l'intégration de l'occupation et l'usage des sols à « grande » échelle est identifiée comme une limite actuelle des modèles hydrologiques (Blöschl *et al.*, 2019).

¹ Projet OPTAIN : "OPTimal strategies to retAIN and re-use water and nutrients in small agricultural catchments across different soil-climatic regions in Europe" <https://www.optain.eu/>

² Cf. les documents d'accompagnement à la modélisation avec SWAT+ sur le site du projet <https://www.optain.eu/deliverables#deliverables>

Les possibilités de coupler plusieurs types de modèles

Une des perspectives de recherche identifiées par Kumar *et al.* (2021) pour mieux parvenir à modéliser les SFN et à tester leur efficacité hydrologique, est de coupler des modèles hydrologiques à base physique avec des modèles applicables à plus grande échelle. Cependant, un tel couplage n'est pas si trivial. D'après Charles Perrin, s'il peut être intéressant de faire communiquer plusieurs modèles (par exemple, pour mieux représenter l'évapotranspiration dans un modèle conceptuel), contraindre un modèle par un autre (contraindre les paramètres d'un modèle conceptuel par les paramètres ou résultats d'un modèle à base physique) est délicat étant donné les logiques différentes des deux types de modèle. Selon Nadia Carluer, il devrait être tout de même possible de faire de l'apprentissage de modèles conceptuels à grande échelle sur les résultats de modèles physiques à petite échelle.

Selon les enjeux traités, il peut aussi être intéressant de coupler une modélisation hydrologique avec d'autres types de modélisation.

Par exemple, pour l'étude du **ruissellement**, et en particulier l'évaluation des impacts d'événements pluvieux intenses (érosion, coulées de boue, inondation), le couplage avec **un modèle hydraulique** (2D) peut s'avérer pertinent.

Pour l'étude de **la recharge d'un aquifère** et de l'évolution de sa piézométrie, l'utilisation d'une **modélisation hydrogéologique** est intéressante. D'après Adrien Selles, un modèle hydrogéologique (un modèle à réservoir par exemple comme le modèle GARDENIA), ou une solution analytique simplifiée peut permettre de relier la recharge (évaluée par une modélisation hydrologique) à l'évolution du niveau piézométrique de l'aquifère.

Pour des questions plutôt **agronomiques** liées à l'eau (disponibilité de l'eau pour les cultures, réservoir hydrique), il est intéressant de coupler modélisation agronomique et hydrologique. Jérôme Molénat, évoque par exemple le couplage du modèle Mhydas (modèle hydrologique de bassin versant) avec le modèle de culture Aqyield (Lebon *et al.*, 2022). Le modèle de culture simule le développement du couvert cultivé en fonction de la réserve hydrique du sol et de la demande évapotranspiratoire atmosphérique (avec comme hypothèse que l'eau est le facteur limitant pour la culture). Le modèle hydrologique permet de distinguer l'état de surface et l'infiltrabilité associée d'une parcelle à l'autre, voire à l'intérieur de chaque parcelle. La finalité de cet outil est de prioriser, selon les caractéristiques agro-pédoclimatiques du site, une solution et sa configuration parmi une multitude envisageable : l'installation d'infrastructures de récolte de l'eau, la limitation du travail du sol, etc. La modélisation permet de raisonner la localisation des aménagements et l'organisation spatiale des occupations du sol, qui est un facteur important d'efficacité de ces solutions.

Enfin, selon Aurore Degré et Judith Eckman, le couplage de modèles hydrologiques et climatiques serait intéressant pour mieux comprendre les effets de la végétation sur le climat local (rugosité, évapotranspiration, condensation) et à plus grande échelle (circulation des vents, etc.).

A quoi peuvent servir ces exercices de modélisation ?

Dans une démarche scientifique : comprendre et évaluer les effets de mesures de ralentissement et conservation de l'eau à l'échelle de bassin versant

La modélisation permet d'étudier les effets des mesures après leur mise en œuvre, et tenter de les attribuer. Cela nécessite de tenir compte des autres sources de changement (ex : climat, prélèvements d'eau pour des usages anthropiques, etc.), de réaliser un suivi instrumenté avant et après la mise en œuvre de ces actions. La démonstration souvent représentée comme « idéale », est d'avoir un bassin similaire servant de témoin. L'expérience est conduite sur deux bassins

appariés, avec un suivi avant changement sur plusieurs années, la mise en relation des débits aux deux exutoires ; puis l'étude de l'évolution de cette relation après le changement sur un des deux bassins (cf. représentation schématique en Figure 12). Cette expérience dite « des bassins jumeaux » nécessite une hypothèse forte de stationnarité du bassin « témoin » (sans changement) et d'une évolution similaire des variables non étudiées sur les deux bassins. Cette approche reste limitée : malgré près de 500 études sur des bassins jumeaux, les effets de la déforestation/reforestation sur l'hydrologie ne sont toujours pas pleinement établis (Blöschl *et al.*, 2019)

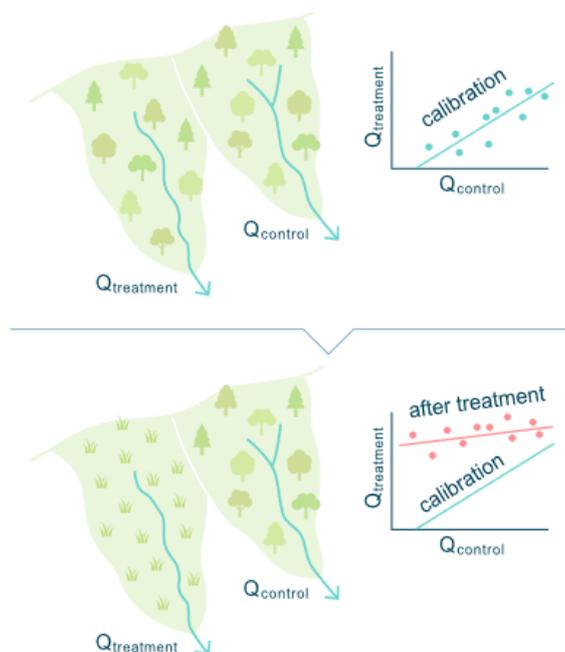


Figure 12 - Schématisation du principe théorique d'une expérience sur des bassins jumeaux (figure issue de van Meerveld and Seibert, 2024)

D'après Charles Perrin, il reste malgré tout difficile d'établir un lien direct entre un changement d'occupation du sol et son effet hydrologique à « grande échelle », du fait des limites des modèles présentées plus haut. Les chroniques de données de pluie et débit avant et après changement doivent être suffisamment longues pour permettre d'identifier des tendances ou des ruptures (statistiques) significatives dans le régime hydrologique. L'évolution sur le long terme d'un bassin est par ailleurs soumise à de nombreux autres facteurs, à la fois naturels et anthropiques qui peuvent se compenser ou se renforcer.

Selon Nadia Carluer, concernant les modèles à base physique, il est également utile de disposer de variables « internes » au bassin-versant étudié, et pas seulement du débit à l'exutoire, pour contraindre suffisamment le modèle et distinguer les facteurs d'évolution de la réponse hydrologique. Or, l'instrumentation et le suivi de paramètres peut demander des moyens humains et financiers importants. Les méthodes d'analyse de sensibilité, d'analyse des incertitudes, et d'assimilation de données peuvent servir à trouver un compromis.

De manière générale, l'étude des effets hydrologiques des SFN à l'échelle du bassin versant souligne les lacunes des modèles hydrologiques, concernant la représentation et l'intégration fine : des usages et de l'occupation des sols, des circulations de l'eau dans le sol et des effets des végétaux sur celle-ci, du phénomène d'évapotranspiration, et des interactions entre écoulements superficielles et souterrains.

Dans une démarche d'accompagnement à la planification de l'aménagement d'un bassin : tester des scénarios et choisir des leviers d'action

La modélisation peut également permettre de tester différents scénarios en amont des choix des actions à mettre en place pour répondre à un enjeu donné. Il peut y avoir un besoin d'évaluer si et dans quelle mesure tel ou tel scénario d'aménagement pourrait permettre de traiter l'enjeu souhaité (par exemple : protéger une zone du ruissellement lors d'épisodes de pluie de période de retour de 30 ans) ; voire d'optimiser la combinaison et la localisation optimales des mesures (ou les prioriser).

Bien que ces approches de modélisation comportent des incertitudes importantes, elles peuvent permettre aux acteurs de considérer et discuter d'alternatives possibles, en termes de scénarios d'aménagement du territoire, comme ce fut le cas pour la modélisation participative de SFN pour la gestion quantitative de l'eau dans le bassin versant de la Seudre (Antoine *et al.*, 2023). La mise en place d'une modélisation peut également permettre de tester la durabilité des SFN et leur efficacité potentielle dans des conditions climatiques futures, même si cette démarche implique beaucoup de sources d'incertitude (Martin *et al.*, 2021).

Dans une visée opérationnelle, les modélisations doivent permettre un compromis entre une bonne représentation des processus hydrologiques, une bonne robustesse, le réalisme en termes d'exigences de données, et l'accessibilité (Kumar *et al.*, 2021; Lalonde *et al.*, 2024).

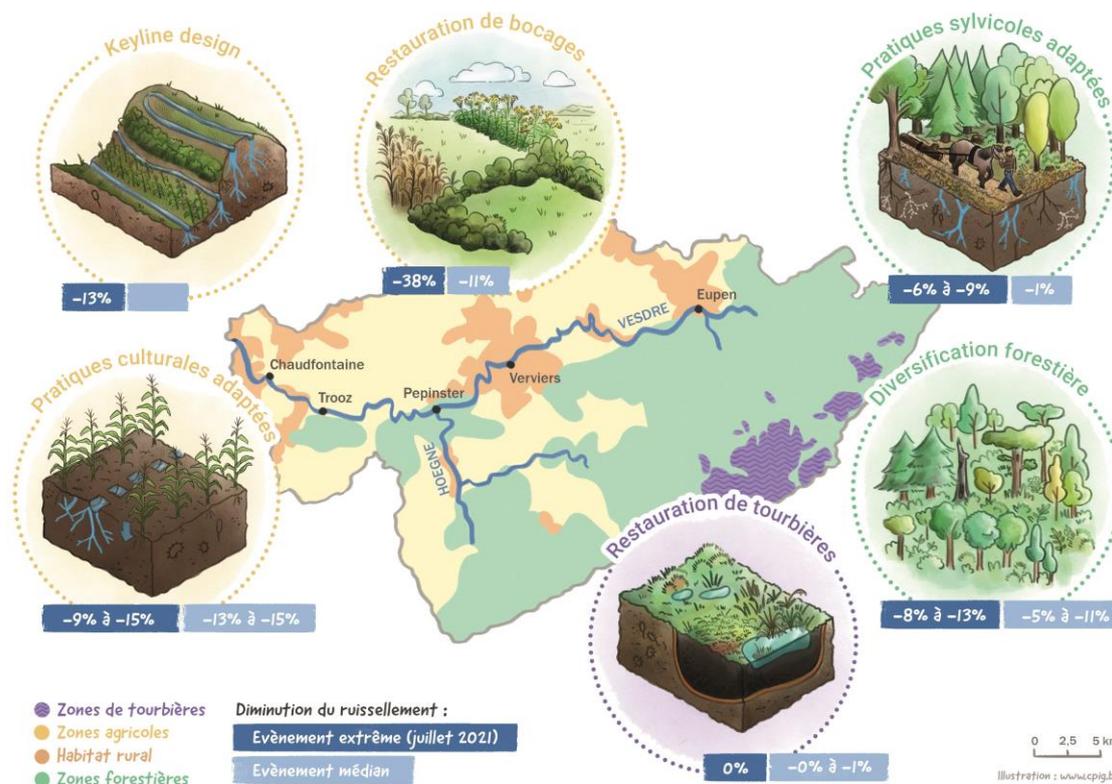
Retour d'expérience : utilisation du modèle MIKE-SHE pour la modélisation de plusieurs sous-bassins du bassin versant de la Vesdre (Belgique) (Convention MODREC-Vesdre, 2023).

Cet exercice de modélisation a servi au plan stratégique de réaménagement du bassin après les inondations destructrices de juillet 2021. Les commanditaires cherchaient à évaluer le potentiel de plusieurs scénarios d'aménagement, et la réponse du bassin versant aux fortes précipitations (en termes de ruissellement) ainsi qu'aux sécheresses (comme en 2019 et 2022).

D'après Aurore Degré, ce modèle a été choisi pour sa capacité à fournir une bonne représentation physique du sol, d'autant plus que les chercheurs disposent de données détaillées sur les sols de cette région. Les effets des modifications apportées dans le scénario (changement des pratiques agricoles, de l'implémentation de haies, de la diversification des espèces en forêts) sur les paramètres du sol ont été dérivés de données de la littérature. Pour la construction de fossés-butées en motifs « keyline », aucune donnée référencée ni expérimentation instrumentée n'ont été identifiées. Les aménagements ont donc été modélisés sur un tout petit bassin (1,1 km²) en éditant à la main le MNT (tracé des fossés et ajout de haies) (Di Maggio, 2023).

Le modèle de chaque bassin (agricole, forestier, tourbeux) a été calé sur le débit à l'exutoire à l'état présent. L'équipe a conscience que la modélisation est imparfaite et risquée car le modèle comprend énormément de paramètres et est finement maillé (taille de maille : entre 20 et 40 m selon les BV). Toutefois, les données d'entrée étaient très détaillées et de très bonne qualité (MNT, occupation du sol, pédologie, météorologie, etc.). Les résultats sont représentés très synthétiquement en figure 13.

Les prochaines étapes du projet sont de mettre en place des expérimentations locales des actions envisagées et de les instrumenter, afin de valider localement le modèle et de servir également de sites démonstrateurs. Un travail d'acquisition de données spatialisées à plus grand échelle s'avérera ensuite nécessaire pour valider le modèle à l'échelle du bassin de la Vesdre.



¹ https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/314437/2/MODREC%20Note%20aux%20D%C3%A9cideurs_Vfinal.pdf

3.4. Perspectives scientifiques et attentes vis-à-vis de la recherche

A partir des entretiens menés et de l'état de l'art bibliographique, nous avons identifié différents fronts de recherche ainsi que des besoins opérationnels adressés à la communauté scientifique. Les principales perspectives sont résumées dans le tableau 3. Elles peuvent être liées les unes aux autres voire interdépendantes.

Tableau 3 – Propositions de perspectives de recherche à partir des entretiens menés. La deuxième colonne cite les références et les entretiens ayant abordé l'axe en question, ainsi que des exemples de projets en cours ou envisagés traitant de celui-ci (source : autrice).

Perspectives identifiées	Source de la donnée : Références ; entretiens ; projets en cours (et projets potentiels identifiés)
Axes de recherche	
Evaluer les effets hydrologiques de combinaisons de mesures (pratiques et aménagements) à petite échelle (échelle d'une parcelle agricole ou d'un ensemble de parcelles par exemple).	(Spongescapes consortium, in press) <i>Lionel Alletto, Jérôme Molénat,</i> Projet OPTAIN
Evaluer et quantifier les impacts hydrologiques de ces approches à l'échelle du bassin versant , afin de mieux connaître leur potentiel et leurs limites.	(Lalonde <i>et al.</i> , 2024; Spongescapes consortium, in press) <i>Lionel Alletto, Judith Eeckman, Permalab</i> Projets BAGHEERA, Spongeworks
Améliorer la représentation des états de surface, de l'occupation des sols, de la végétation (et leurs dynamiques) dans les modèles hydrologiques et climatiques .	(Blöschl <i>et al.</i> , 2019; Kumar <i>et al.</i> , 2021) <i>Aurore Degré, Charles Perrin, Judith Eeckman,</i>
Améliorer la compréhension des effets hydrologiques et climatiques des états de surface, de l'occupation des sols (de la végétation notamment), ainsi que des interfaces et échanges entre compartiments (atmosphère-surface-subsurface) ; à travers des observations poussées et des modèles exigeants.	(Blöschl <i>et al.</i> , 2019; Conseil scientifique du comité de bassin Adour-Garonne, 2024; Eeckman <i>et al.</i> , 2025; van Meerveld and Seibert, 2025) <i>Aurore Degré, Judith Eeckman, Benoît Fribourg-Blanc, Permalab, Jérôme Molénat</i>
Tendre vers une identification des processus dominants et des facteurs déterminants.	(Observatoires de la zone critique, OZCAR)
Intensifier les connexions entre différentes disciplines de recherche, au sein des sciences environnementales, avec et au sein des sciences humaines et sociales pour : 1/ étudier les complémentarités, tensions, rétroactions, etc. entre différents types d'impacts (biophysiques, écologiques, socio-économiques...), 2/ étudier les facteurs et conditions de transformation des pratiques et les représentations individuelles et collectives, menant à l'adoption de ces types de mesures à différentes échelles.	<i>Aurore Degré, Benoît Fribourg-Blanc, Judith Eeckman, Olivier Hébrard, Adrien Selles</i>

Accompagnement de l'opérationnalisation des approches de ralentissement et conservation de l'eau en tête de bassin-versant	
Développer et améliorer des outils de transposition accessibles : arbres de décision, modèles hydrologiques, autres modèles, etc. pour guider la conception des mesures.	(Kumar <i>et al.</i> , 2021) <i>Olivier Hébrard, Jérôme Molénat</i> Projet OPTAIN
Mettre au point et structurer des indicateurs systémiques pour évaluer les mesures selon différentes métriques et valoriser leur multifonctionnalité	(Spongescapes consortium, in press) <i>Judith Eeckman, Benoît Fribourg-Blanc</i>
Développer et accompagner des programmes de recherche appliquée sur des territoires pilotes , avec des suivis instrumentés dans la durée ; pour à la fois soutenir les initiatives d'expérimentation locales, et améliorer la connaissance sur l'efficacité de ces approches.	(Lalonde <i>et al.</i> , 2024; Eeckman <i>et al.</i> , 2025) <i>Olivier Hébrard, Claire Petitjean, Charles Perrin, Judith Eeckman, Jérôme Molénat</i> Projet Spongeworks, (<i>Living Lab du PEPR One Water</i>), (<i>Observatoires de la zone critique OZCAR</i>)

4. Quelques enjeux de connaissance associés aux approches visant à ralentir et conserver l'eau dans les versants

Cette dernière partie présente et discute différents enjeux opérationnels et scientifiques liés à la production et au transfert de connaissance sur les mesures de ralentissement et de conservation de l'eau dans les têtes de bassin versant, en particulier sur leurs effets hydrologiques. Elle est nourrie par l'analyse des douze entretiens menés. Elle est à vocation exploratoire, étant donné le nombre limité d'entretiens et leur absence de représentativité.

4.1. Ralentir et conserver l'eau dans les versants : des mesures « sans regret » ?

Dans un contexte de changement climatique et de tension sur les ressources en eau, les gestionnaires de l'eau et des territoires cherchent à adapter leurs stratégies. Les mesures de conservation de l'eau basées sur le fonctionnement des écosystèmes sont alors souvent présentées comme étant « sans regret », malgré les incertitudes associées à leur efficacité. Que peut signifier ce qualificatif, et que peut-il impliquer ?

4.1.1. Les projections climatiques et hydrologiques anticipent des impacts importants du changement climatique sur les ressources en eau...

Les impacts du changement climatique sur les ressources futures en eau sont difficiles à évaluer, du fait de la nature complexe des phénomènes climatiques et des processus hydrologiques. Des exercices nationaux et locaux de modélisation estiment ces évolutions, en intégrant les incertitudes inhérentes à ce type d'exercice, qui sont liées, aux choix des scénarios d'émissions futures de gaz à effet de serre, à la variabilité des projections climatiques, et aux modèles hydrologiques eux-mêmes.

Le projet de recherche **Explore2**¹ a ainsi permis d'obtenir des projections de débits futurs sur l'ensemble des cours d'eau peu influencés de la France métropolitaine, selon plusieurs scénarios d'émissions. D'après les résultats des projections, présentés de manière guidée sur le site *Méandre*², le changement climatique introduira de manière certaine une baisse des débits moyens dans la partie sud de la France (cf. Figure 14). Les évolutions pour le nord de la France sont moins certaines, allant plutôt vers plus d'eau sur l'année.

Néanmoins, l'augmentation très probable de la sévérité des étiages estivaux concerne l'ensemble du territoire : « *en été, le déclin des précipitations s'étend vers le nord, et associé à l'augmentation générale de l'évaporation due au réchauffement, conduit à une diminution drastique des débits des cours d'eau. L'ensemble des projections du projet Explore2 s'accorde sur cette sévérité accrue des étiages d'été.* ». Les effets sur les crues sont en revanche beaucoup plus incertains, avec des augmentations ou diminutions selon les modèles et les zones géographiques.

Les résultats de ces modélisations concernent l'hydrologie naturelle c'est-à-dire ne tenant pas compte des influences humaines mais seulement de l'évolution du climat (précipitation, température, etc.). Ils n'incluent ni les prélèvements d'eau ni les changements physiques sur le bassin versant, en partie induits par le changement climatique, tel que le changement de la végétation. Cela constitue une incertitude supplémentaire de ces exercices prospectifs de modélisation.

¹ Le projet Explore2 est un projet de recherche coordonné par l'INRAE et l'OiEau entre 2021 et 2024, soutenu financièrement par l'OFB, le ministère de la Transition écologique <https://www.inrae.fr/actualites/explore2-life-eauclimat-cles-ladaptation-gestion-leau> ; <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/explore2-impacts-du-changement-climatique-ressource-eau-horizon-2100>

² <https://meandre.explore2.inrae.fr/>

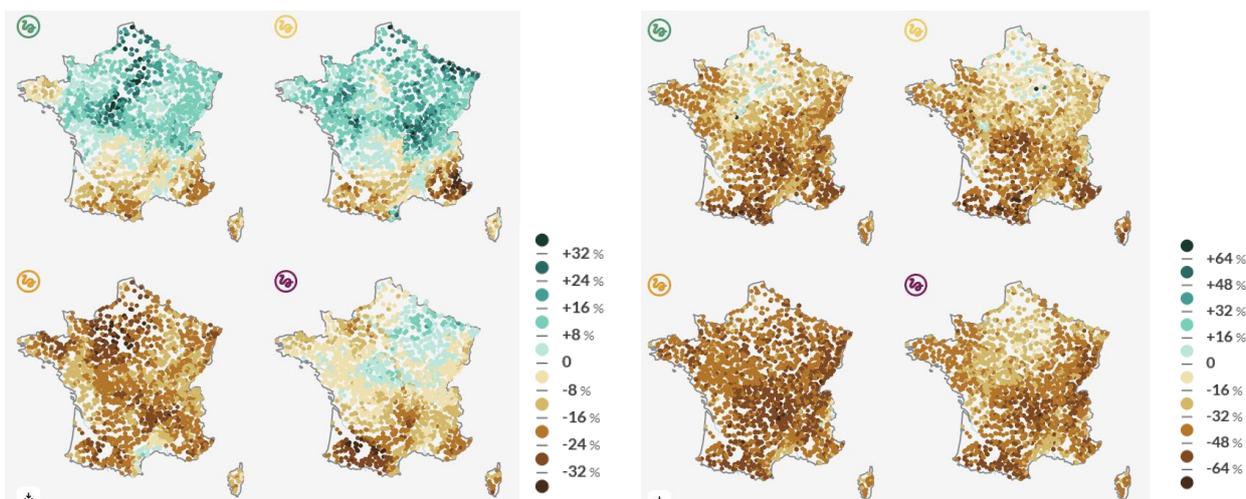


Figure 14 – Représentation synthétique de certains résultats du projet Explore 2 portant sur la modélisation de l'hydrologie future de la France métropolitaine. Gauche : Moyenne annuelle des débits journaliers pour 4 narratifs (évolution de -32% à +32% à horizon futur de 2070 à 2099, par rapport à une période de référence de 1976 à 2005) ; Droite : minimum estival de la moyenne sur 10 jours du débit journalier (période de mai à fin novembre) (évolution de -64% à +64% à horizon futur de 2070 à 2099, par rapport à une période de référence de 1976 à 2005)

Les 4 narratifs correspondent à 4 projections contrastées issues des modélisations : VERT Réchauffement marqué et augmentation des précipitations ; JAUNE Changements futurs relativement peu marqués ; ORANGE Fort réchauffement et fort assèchement en été (et en annuel) ; VIOLET Fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations

Source : site internet méandre projet Explore 2¹

4.1.2. ...nécessitant l'adaptation des usages et des écosystèmes à des quantités d'eau disponibles plus faibles en été

Ainsi, les territoires du sud de la France connaîtront très certainement une diminution des débits et des ressources en eau, augmentant la vulnérabilité des écosystèmes et des usages. Les gestionnaires de ces territoires cherchent d'ores et déjà à développer des stratégies d'adaptation. Exploitants agricoles et collectivités locales se mobilisent, comme le soulignent les experts interrogés, et s'intéressent de plus en plus aux approches mobilisant des solutions de ralentissement et de conservation de l'eau dans l'optique de « passer à travers des périodes assez longues sans eau ou avec assez peu d'eau » (source : entretien).

C'est le cas par exemple de la Commission locale de l'eau (CLE) de la Drôme qui a conduit une étude prospective pour l'adaptation du territoire au changement climatique². Ce territoire est en déséquilibre quantitatif (SDAGE 2022-2027), et les projections d'évolution des débits moyens estivaux (juin à septembre) à horizon 2050 estiment une réduction de l'ordre de -25 à -35 % selon les cours d'eau, sous l'hypothèse du scénario d'émissions RCP 4.5 (ACTeon, 2022). L'étude prospective menée par la CLE a permis de coconstruire et d'adopter une « stratégie SAGE Drôme 2050 »³ à l'échelle du bassin versant de la Drôme, reposant sur 4 axes structurants et interdépendants : la sobriété, la résilience des milieux et des sols, le partage et le stockage de l'eau. L'axe « résilience » prévoit ainsi la mise en œuvre de mesures de ralentissement et de conservation de l'eau dans les têtes de bassin versants (SAGE Drôme, 2024). D'après les retours de la phase de concertation pour

¹ <https://meandre.explore2.inrae.fr/>

² <https://www.riviere-drome.fr/actions-etudes/les-etudes/SAGEDROME2050>

³ <https://www.riviere-drome.fr/actions-etudes/les-etudes/SAGEDROME2050>

l'élaboration de la stratégie, les participants ont insisté sur le caractère « sans regret » de ce type de solution, bien que l'impact de leur mise en œuvre à grande échelle soit considéré comme incertain (ACTeon, 2024).

Les acteurs opérationnels locaux se retrouvent à décider en situation d'incertitude et d'information incomplète, concernant les effets du changement climatique et l'efficacité des mesures considérées. Dans ce contexte, considérer ces solutions comme « sans regret » semble rassurer et susciter de l'espoir (source : entretien).

Des acteurs institutionnels comme les Agences de l'Eau, l'ADEME, ou le Ministère de l'Ecologie emploient également ce terme d'« actions sans regret » pour qualifier certaines solutions d'adaptation au changement climatique et à la diminution de la ressources en eau (tableau 4). Les experts que nous avons interrogés signalent également l'utilisation de ce qualificatif par les partenaires politiques et techniques de leurs projets, que ce soient en matière d'HR, de SFN, de MNRE ou de mesures éponges.

Que traduit l'utilisation de ce terme pour qualifier les mesures de ralentissement et conservation de l'eau ? Qu'en pensent les experts et acteurs opérationnels que nous avons interrogés ?

Du point de vue institutionnel, l'emploi et l'utilisation du qualificatif « sans regret » demeure assez disparate et flou, comme en témoigne le tableau 4. Certains acteurs le définissent, comme l'ADEME (des actions bénéfiques pour la société quelle que soit l'ampleur du changement climatique), d'autres pas complètement, avec parfois la mention d'un caractère multifonctionnel (AE Loire Bretagne et AE Seine-Normandie).

Tableau 4 - Utilisations du qualificatif "sans regret" par des institutions publiques pour désigner des actions ou mesures d'adaptation au changement climatique ou de gestion quantitative de l'eau (source : autrice, citations tirées de sites internet ou documents institutionnels)

Mentions du qualificatif « sans regret »	Source
« Les actions à mettre en œuvre pour conduire le territoire vers la résilience doivent répondre à différents critères. Elles doivent être flexibles et s'adapter à la production de nouvelles connaissances, ne pas entrer en conflit avec le principe d'atténuation du changement climatique et présenter des bénéfices pour le territoire, quelle que soit la situation future . On parle alors de mesures sans regret : ces actions présentent des bénéfices quand bien même l'impact du changement climatique est inférieur à celui envisagé. Ce type d'actions participe alors à l'attractivité socio-économique du territoire et à l'amélioration du cadre de vie. »	Site de l'ADEME ¹
Définition de actions « sans regret » : « Actions bonnes pour la société quels que soient les scénarios climatiques et socio-économiques à venir. »	Site de l'Agence de l'eau Seine Normandie ²
La stratégie d'adaptation du bassin repose sur « la multifonctionnalité, la solidarité et la poursuite de solutions sans regret face aux fortes incertitudes sur le futur », elle « met à disposition divers outils pour envisager l'adaptation sur les territoires » dont le premier est « favoriser l'infiltration à la parcelle et végétaliser les villes et villages ».	Site de l'Agence de l'eau Seine Normandie ³

¹ <https://www.territoires-climat.ademe.fr/ressource/410-144>

² <https://www.eau-seine-normandie.fr/node/4420>

³ https://www.eau-seine-normandie.fr/domaines-d-action/strategie_adaptation_climatique

L'un des « principes structurants » du plan d'adaptation au changement climatique et de « S'orienter vers des mesures dites « sans regret » , durables, à la fois gagnantes pour les acteurs concernés et la société, pour la politique de l'eau du comité de bassin, autant que possible multifonctionnelles et favorables à l'atténuation. »	Site de l'Agence de l'eau Loire Bretagne ¹
« L'additif à l'instruction du 7 mai 2019 précise que le PTGE doit déboucher in fine sur « un programme d'actions multi-partenarial, qui a vocation à comporter une diversité d'actions, dont certaines obligatoires d'économies d'eau (réduction des fuites dans les réseaux d'alimentation en eau potable, économies d'eau pour les ICPE, adaptation des pratiques agricoles, transition agro-écologique, amélioration de la fonctionnalité des sols, structuration de nouvelles filières agricoles, mise en œuvre de solutions fondées sur la nature, etc.) et donc à sceller l'engagement de tous les acteurs à agir (...). » Cet additif indique par ailleurs que « des actions qui apportent une sécurisation des usages ou une atténuation des pressions, et pour lesquelles un consensus des acteurs du territoire se dessine rapidement, peuvent être mises en œuvre sans attendre la validation du scénario et programme d'actions associé ». Ces actions dites « sans regret » sont bénéfiques quelle que soit l'ampleur du changement climatique (amélioration de la qualité de l'eau, maîtrise des consommations, économies d'eau, etc.). »	Guide d'élaboration et de mise en œuvre des PTGE (publié par le Ministère de l'écologie en août 2023) ²

Pour certains des acteurs opérationnels interrogés, le qualificatif « sans regret » est associé à des actions dont on peut difficilement chiffrer et prévoir l'efficacité, mais dont on attend des co-bénéfices et qui semblent aller « *dans le bon sens* ». Ces actions, même si elles se révélaient n'avoir pas d'effets significatifs sur l'enjeu quantitatif (économies d'eau, alimentation des cours d'eau, etc.), seraient bénéfiques par ailleurs (en termes écologiques, sur la qualité de l'eau et des sols, le bien-être des populations, etc.), mais aussi sans risques ou effets négatifs importants. Pour d'autres, l'emploi de ce qualificatif signe une certaine confiance dans les effets positifs de ce type de mesures : « *on replante des arbres, on remet des haies, on recrée des mares (...), c'est sans regret sur tous les enjeux (...) ça ne peut pas aller dans le mauvais sens* ».

D'autres acteurs, en particulier certains scientifiques, sont plus prudents. Ils soulignent le manque de résultats éprouvés sur l'ampleur de l'efficacité des mesures, sur l'évaluation des co-bénéfices ou encore sur l'absence de risques ou d'effets négatifs. Le terme « d'actions sans regret » n'est pas utilisé par la communauté scientifique : « *c'est une notion forte qui sonne comme « solution de la dernière chance »* », « *certaines mesures ne sont pas efficaces à un endroit donné, voire ont des effets négatifs* », « *il faudrait privilégier la recherche de solutions « adaptées », en connaissance de l'environnement* ».

Certains soulignent également l'investissement financier et humain potentiellement conséquent pour mettre en œuvre des mesures de ralentissement et conservation de l'eau, à grande échelle, même si elles sont souvent présentées comme *low-tech* et *low-cost* (à faible coût et investissement technique). Les décideurs et gestionnaires réclament alors des garanties (si possible quantifiées) sur leur efficacité et/ou durabilité dans le temps, que les experts et techniciens sont en peine de fournir. Les incertitudes autour de l'efficacité constituent un potentiel frein à l'engagement des acteurs opérationnels. Les effets réels sont d'ailleurs rarement évalués de manière quantitative : la mise en place de suivis analytiques nécessite un investissement technique et financier contrastant

¹ <https://agence.eau-loire-bretagne.fr/home/comite-de-bassin/le-comite-de-bassin-se-dote-dun-plan-dadaptation-au-changement-c.html>

² https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/Guide%20projet%20de%20territoire%20gestion%20de%20l%20eau_light.pdf

avec le caractère *low-tech* des approches, et augmente de manière significative le budget nécessaire à leur mise en œuvre.

Les experts et acteurs interrogés s'accordent sur l'importance de penser la complémentarité des solutions, plutôt que leur compétition. Certains mentionnent explicitement que l'adoption d'approches d'hydrologie régénérative ou de SFN peut être pensée comme complément à des solutions dites grises, à de l'irrigation ou à d'autres solutions de stockage « en dur », qui dans certains cas seraient nécessaires. Les choix d'adaptation, quels qu'ils soient, impactent durablement les territoires, d'où l'intérêt d'adopter des démarches d'adaptation itératives comme des approches par trajectoires (Haasnoot *et al.*, 2013).

4.2. Enjeux liés à l'émergence et à la multiplication de nouvelles notions

Comme présentées en partie 3.1.3, les notions pouvant être associées au ralentissement de l'eau sont diverses : solutions fondées sur la nature, mesures naturelles de rétention d'eau, hydraulique douce, hydrologie régénérative, mesures éponges, etc. **Comment les experts scientifiques et acteurs opérationnels appréhendent-ils cette multiplicité, et comment réagissent-ils à l'émergence récente et la diffusion rapide de l'hydrologie régénérative ?**

Certains des acteurs interrogés avancent que la multiplicité des approches peut favoriser l'appropriation des mesures de ralentissement et de conservation de l'eau et ainsi faciliter leur mise en œuvre, par leur insertion dans des champs d'expertise et d'action existants, et spécifiques à différentes communautés (agroécologie, gestion forestière, gestion des eaux pluviales, gestion de la ressource, etc.). Ainsi, un interviewé souligne le caractère intégratif de ces notions, qui permettent « à chacun d'avoir sa porte d'entrée ». Un autre indique : « *chaque communauté a ses propres habitudes et ses propres langages. Le fait de développer des termes spécifiques, c'est une manière de les aider à s'approprier le thème* ».

L'usage de différentes notions illustre aussi la diversité des contextes et enjeux traités (urbain vs rural, excès vs manque d'eau). Un des experts interrogés explique par exemple que « *parler de mesures de ralentissement et de temporisation, ou de zones d'expansion de crues* » [...] illustre qu'on vient du monde de l'excès d'eau ». Certains remarquent que les notions de SFN ou de « ville éponge » sont actuellement davantage utilisés pour des projets et enjeux en contexte urbain, alors que l'HR se développe d'abord pour un contexte agricole, et souvent sur l'amont des bassins versants.

Par ailleurs, une partie des scientifiques, plus éloignés des acteurs opérationnels, accordent peu d'attention aux notions utilisés en arguant qu'elles sont semblables du point de vue des processus. Un interviewé indique ainsi : « *tout ça revient à étudier comment préserver et comment maintenir les ressources en eau en faisant des aménagements de surface* ». Certains experts interrogés indiquent d'ailleurs n'employer que des termes se référant aux processus ou aux effets recherchés, tels que : « *pratiques de conservation des eaux et des sols* », « *ralentir l'eau* », ou encore « *rétention* », « *diminution des crues* », « *soutien à l'étiage* ».

Il n'en demeure pas moins que les termes de SFN, et plus récemment d'hydrologie régénérative ou de paysages éponges, connaissent un succès certain dans les sphères institutionnelles et opérationnelles, conditionnant en partie les financements des projets de recherche et les partenariats avec les acteurs de terrain. « *Tout le monde en parle* », indique un interviewé, au point de « *devoir systématiquement le mettre pour répondre des appels à projets* ». Plusieurs scientifiques témoignent des sollicitations accrues qu'ils reçoivent de la part d'acteurs souhaitant mettre en place ce type d'approche. C'est « *une notion qui suscite beaucoup d'intérêt auprès des pouvoirs publics, des gestionnaires de l'eau et des territoires, (...) on est sollicité tous les quatre matins sur ces questions* ».

d'hydrologie régénérative (...) je suis frappé de voir le nombre de sollicitations qu'on a depuis un an vis-à-vis de l'hydrologie régénérative ».

L'une des raisons de cette rapide diffusion, mentionnée par plusieurs interviewés, est le caractère très parlant de ces terminologies, s'appuyant sur des images très évocatrices des concepts sous-jacents, qu'il s'agisse de régénération, d'éponge, ou de nature. Ils sont plus accessibles comparés à des termes très techniques, comme « *favoriser l'infiltration et la rétention dans les sols* », qui « *ne font pas rêver* » (source : entretien).

L'émergence du terme « éponge » dans des projets européens comme *Spongeworks* et *Spongescapes*, en témoigne : « *quand on parle d'éponge, les gens comprennent beaucoup mieux que quand on parle de MNRE* » (source : entretien). Ce terme est facilement compris par une large communauté de parties prenantes, ce qui peut permettre de faciliter la sensibilisation à cette approche et sa mise en œuvre (Mémoire de master de Louis Bonhoure, 2024).

Le terme d'« hydrologie régénérative » est qualifié de « *très communicant* », « *beau* », « *vendeur* » (source : plusieurs entretiens). Pour une des personnes interviewées, il est même « *porteur d'espoir* », et ainsi mobilisateur, même si elle souligne dans le même temps qu'il faut rester vigilant et raisonnable sur les effets attendus et ne pas « *dériver vers trop d'optimisme* ».

Enfin, certains interviewés soulignent le risque que ces termes deviennent galvaudés, ou perdent rapidement de leur sens à force d'être utilisés pour tout, parfois à tort et à travers.

Par ailleurs, les experts interrogés réagissent de manière contrastée à l'engouement opérationnel pour l'hydrologie régénérative.

Les experts travaillant sur des approches similaires, telles que l'agroécologie, les techniques de conservation de l'eau, la gestion des états de surface, répondent favorablement aux sollicitations d'acteurs se revendiquant de l'HR ou adoptant cette notion, mais expriment aussi quelques interrogations : « *Là où le terme hydrologie régénérative me gêne, c'est que tout ça existe déjà* » ; « *Pourquoi les gestionnaires viennent nous chercher maintenant alors que ça fait 20 ou 25 ans qu'on travaille dessus ?* » (source : entretiens). L'un d'eux s'interroge sur ce qui peut manquer dans le transfert des connaissances, en reconnaissant que la visibilité et la dynamique impulsées autour de l'HR peuvent être positives : « *Il y a un certain nombre d'acteurs qui, en ayant trouvé une sorte de notion un peu valise, ont su faire ce que nous, on n'a pas su faire depuis des années, c'est-à-dire mettre l'accent sur le fait que la gestion de l'eau ne passe pas forcément par la gestion de l'eau bleue, par la construction d'infrastructures type gros barrages, des tuyaux, mais que ça passe par la gestion de l'eau verte et la gestion de l'eau du sol, qui est particulièrement importante* ».

Certains risques et dérives sont également soulignés, tels que les risques de simplification et de focalisation sur les aménagements : « *Il y a ces principes-là, on les applique, ça résout tout. [...] Et hop, l'hydrologie régénérative arrive, on va bloquer l'eau, et on ne se questionne pas sur le reste. Et ça évite de repenser tout le système agronomique aussi* » (source : entretien).

Par ailleurs, dans l'étude de la littérature grise (documents, vidéos, interviews), nous avons pu identifier que certaines informations erronées ou des interprétations hâtives (par exemple, un projet d'autoroute de la pluie dans le Sud-Ouest¹) circulent largement. Certaines d'entre elles ont d'ailleurs suscité des réactions formelles de la part de scientifiques (cf. la note du positionnement du conseil scientifique de l'Agence de l'eau Adour-Garonne sur l'hydrologie régénérative²).

¹ <https://www.autoroutedelapluie.org/le-projet/>

² https://eau-grandsudouest.fr/sites/default/files/2024-10/Note_CS_hydrologie%20r%C3%A9g%C3%A9n%C3%A9rative_0.pdf

4.3. Rôles des scientifiques et recommandations

Dans ce contexte, comment les scientifiques et experts considèrent-ils leur rôle dans l'étude et la mise en œuvre de ces approches ?

Les scientifiques interrogés semblent s'accorder sur le besoin :

- de s'intéresser aux approches et techniques développées de manière empirique pour mieux comprendre leurs effets, les quantifier, et pouvoir donner des préconisations en termes de dimensionnement, de conception ;
- d'identifier les « *lignes claires* » dans la connaissance, les éléments sur lesquels les gestionnaires peuvent s'appuyer avec une certaine confiance ;
- de préciser les limites de cette connaissance afin de prévenir des interprétations ou généralisations hâtives.

Cela rejoint les recommandations issues de guides institutionnels, comme le rapport de l'UNESCO sur les SFN pour la gestion de l'eau publié en 2018 : « *Des inférences ou des suppositions sont faites, souvent à tort, sur les fonctions hydrologiques opérant dans les écosystèmes et donc sur l'efficacité par laquelle elles peuvent altérer le cycle hydrologique et apporter des avantages aux populations. [...] Les services hydrologiques et autres fournis par différents types d'écosystèmes varient considérablement. Il revient à dire que les applications des SfN doivent être moins basées sur des hypothèses généralisées et mieux évaluées et conçues spécifiquement pour des applications locales.* » (P 120)(WWAP / ONU-Eau, 2018).

Plusieurs scientifiques et experts interrogés recommandent en effet une approche au cas par cas, sans solution générique ou unique vis-à-vis de la mise en œuvre et du suivi des solutions de type SFN ou HR. Il s'agit de bien identifier et caractériser les principaux enjeux (le type et l'ampleur des aléas ciblés par exemple), d'identifier les compromis et les synergies entre ces enjeux, ainsi que les potentiels co-bénéfices. Ils insistent sur la nécessité d'établir un diagnostic précis reposant sur des données et mesures de terrain (sol, géologie, hydrologie, climat...), de proposer des combinaisons d'options adaptées à la situation locale, et de les tester si possible à l'aide d'une modélisation. Si l'approche est expérimentale, innovante, les experts interrogés recommandent de mettre en place un suivi quantifié avant/après pour évaluer l'efficacité (suivi d'indicateurs pédologiques, mais aussi débits, piézométrie, etc. selon les effets attendus) voire un suivi sur le long terme (plusieurs années).

5. Limites et perspectives du travail mené

Ce travail de synthèse concernant les approches visant à ralentir et conserver l'eau dans les têtes de bassin versant présente des limites :

- **Peu d'ordres de grandeur chiffrés des effets sont donnés.** Cette limite découle des choix de méthode qui ont été fait. Elle souligne la difficulté à recenser et synthétiser tous les résultats des expérimentations menées, qui sont extrêmement divers en termes d'échelle et de contexte d'application, de moyens mis en œuvre, et d'outils d'évaluation (instrumentation, modèles). Les effets étant très spécifiques au site d'application (climat, pédologie, géologie, topographie, etc.), ces ordres de grandeurs n'ont de sens que dans le contexte dans lequel ils ont été acquis, permettent difficilement de monter en généralité. Ils sont cependant intéressants à recenser, notamment pour guider ou inspirer des acteurs concernés par une situation, un milieu ou contexte proche. Ce travail de recensement des retours d'expérience chiffrés est effectué dans certaines revues de la littérature et productions « grises » (par exemple, dans la *critical review* réalisée par le projet *Spongescapes* en cours de publication), qui ne précisent pas toujours bien la méthode d'évaluation et les spécificités du site.
- **Les effets portant sur d'autres éléments que la quantité d'eau n'ont pas été caractérisés.** D'autres effets sont évoqués dans la littérature tels que les effets écologiques de la restauration ou préservation de milieux naturels, supports de biodiversité ; l'amélioration de la qualité de l'eau, des sols et de l'air ; les fonctions paysagères, de lien social et de bien-être. Cette multifonctionnalité mériterait d'être davantage étudiée et évaluée, étant donné qu'elle est parfois avancée comme argument face au déficit de garantie d'efficacité sur les effets hydrologiques. Certaines publications existent en la matière, comme par exemple le rapport d'évaluation NEXUS de l'IPBES (McElwee *et al.*, 2025).
- **Les actions de préservation et de restauration de milieux aquatiques ou humides (zones humides, ripisylves, cours d'eau) n'ont pas été approfondies,** bien qu'ils se situent aussi en tête de bassin versant et interviennent dans le ralentissement et la conservation de l'eau dans les paysages. Cette limite est due au manque de temps et à la diversité déjà grande des milieux et techniques traités.

Ce travail présente aussi des limites dues à son caractère exploratoire, transversal et interdisciplinaire :

- Le traitement du sujet des effets hydrologiques de mesures de ralentissement et de conservation de l'eau dans les têtes de bassin versant relève d'une grande pluralité de disciplines de recherche et renvoie à une variété de techniques et d'objets (parfois qualifiés de manières différentes). Cette diversité et pluralité a constitué une difficulté pour délimiter l'objet de recherche.
- **L'étude est en outre non exhaustive.** Il est probable que nous n'ayons pas réussi à identifier l'intégralité des références scientifiques sur le sujet et certaines, bien qu'identifiées, n'ont pu être étudiées en profondeur.
- **Les personnes sélectionnées pour les entretiens réalisés ne sont pas représentatives de la diversité des scientifiques, experts et acteurs opérationnels connaissant le sujet.** Ils ne représentent en particulier pas la diversité des situations, des opinions, des besoins et travaux menés actuellement à ce sujet. Seulement douze personnes ont été interrogées, sélectionnées à partir des réseaux de l'autrice et de ses encadrantes : six scientifiques (hydrologues, agronomes, hydrogéologues) et six personnes en position d'« interface » (experts, consultants, techniciens de collectivités). D'autres profils ou champs d'expertises seraient pertinents à consulter : des écologues, climatologues, hydrauliciens,

géomorphologues, etc. ainsi que des agriculteurs, gestionnaires forestiers, représentants d'agences de l'eau ou d'autres services de l'Etat, etc.

Enfin, des perspectives peuvent être envisagées :

- **Le suivi des initiatives**, comme celles de collectivités territoriales en Drôme-Ardèche autour de « plans d'hydrologie régénérative », en encourageant des programmes d'instrumentation ambitieux ;
- **Le recensement et le partage de retours d'expérience** avec des résultats précis ;
- La poursuite des échanges avec les acteurs des territoires et de la gestion de l'eau, pour mieux **identifier les besoins de connaissance** ;
- **L'approfondissement de l'analyse des enjeux de connaissance** (Qui a besoin de garanties, de modèles, de données chiffrées, et pourquoi ? Quelle place tient l'expertise dans les processus de décision ?), **de mise en œuvre** (Quels sont freins et leviers à l'engagement et à l'acceptation ? Qui porte la responsabilité et l'effort associés à ces actions ? Comment s'articulent-elles avec des approches de génie civil ?), **et de diffusion de ces approches** (Quels sont les facteurs et les conditions de diffusion ?).

6. Conclusion

Cette synthèse est le fruit d'un travail de stage de cinq mois sur les mesures visant à ralentir et conserver l'eau dans les têtes de bassin versant. Elle vise à mieux cerner les effets hydrologiques que l'on peut en attendre, dans des contextes agricoles et forestiers, de l'échelle de la parcelle agricole à celle du bassin versant.

L'analyse de publications scientifiques et de littérature grise, ainsi que les entretiens menés, ont mis en évidence les points suivants :

- Différentes mesures permettent le ralentissement et la conservation de l'eau en tête de bassin-versant. Elles relèvent de trois catégories : **l'adoption de pratiques agricoles et forestières adaptées** (agriculture de conservation, agroécologie, agroforesterie, etc.), **la conception de petits aménagements** (fossés, mini-retenues, etc.) **et la restauration, préservation ou création de milieux naturels particuliers** (haies, prairies, forêts, zones humides, etc.).
- Bien qu'anciennes, ces mesures font l'objet d'un regain d'intérêt au regard d'enjeux quantitatifs, notamment de raréfaction de l'eau. Elles sont au cœur d'approches récentes, revendiquant un caractère systémique, les principales étant : **les solutions fondées sur la nature, les mesures naturelles de rétention d'eau, l'hydrologie régénérative et les paysages éponges** (partie 3.1.3).
- Ces approches visent à traiter divers enjeux liés à la quantité d'eau, à des échelles variées et pour des milieux différents (disponibilité de l'eau pour les cultures, sécheresses, inondations par ruissellement, érosion, faible recharge des nappes, etc.) (partie 3.1.1). En termes de processus hydrologiques, ces approches s'appuient toutes principalement sur l'atténuation du ruissellement et l'augmentation des capacités d'infiltration et de rétention de l'eau dans les sols (partie 3.1.2).
- Les preuves de l'efficacité de ces approches s'appuient à la fois sur des savoirs et observations empiriques et des travaux scientifiques. **Les effets localisés de nombreuses « mesures » sont relativement bien établis, les études mettant en évidence la forte dépendance au contexte local.** Les résultats sur les effets hydrologiques de ces mesures

restent parcellaires, dispersés et spécifiques aux sites d'étude, ce qui rend difficile une montée en généralité. Certaines lacunes dans la connaissance, certains points d'incertitude et débats persistent, par exemple concernant le bilan hydrique de la plantation d'arbres, ou les effets cumulés de petites retenues (partie 3.2).

- Le potentiel d'une **approche intégrative à l'échelle du bassin versant** (une conception optimisée d'une combinaison de mesures, selon le fonctionnement hydrologique du bassin) **demeure un front de recherche**. Ce potentiel est encore difficile à évaluer du fait du manque d'expérimentations à grande échelle qui auraient été suivies et caractérisées rigoureusement, de la complexité des processus et de leurs interactions, de l'effort et du coût liés à l'instrumentation sur le long terme, et des limites des modèles numériques. Notamment, l'étude des changements d'occupation du sol et des changements de végétation est une limite actuelle des modèles hydrologiques (partie 3.3).
- Les **fronts de recherche** portent en particulier sur la mise en œuvre d'expérimentations suivies et évaluées sur le long terme, et le développement et l'amélioration d'outils de transposition (indicateurs, modèles) (partie 3.4).
- Concernant les **enjeux de connaissance**, les personnes interrogées font part à la fois de l'intérêt de ces nouvelles approches intégratives et mobilisatrices pour les acteurs opérationnels, tout en soulignant les limites qu'elles comportent. Ils pointent en particulier des risques de généralisation, d'extrapolation ou d'exagération des effets hydrologiques induits (partie 4).

Une citation du conseil scientifique de l'Agence de l'eau Adour-Garonne semble adaptée pour conclure cette synthèse, résumant la connaissance actuelle (et ses limites) des liens entre aménagement des territoires, végétation, eau et climat :

« De nombreux travaux scientifiques démontrent que les changements dans l'utilisation et la couverture des sols modifient le cycle de l'eau à l'échelle mondiale, régionale et locale, en changeant les précipitations, l'évaporation, les inondations, la recharge et la qualité des eaux souterraines et la disponibilité de l'eau douce pour une variété d'utilisations. Étant donné que toutes les composantes du cycle de l'eau sont connectées (et liées au cycle du carbone), ces changements dans l'utilisation des sols se répercutent aussi indirectement sur de nombreuses autres composantes du cycle de l'eau et du système climatique. Toutefois, l'ensemble des effets de l'occupation du sol sur le cycle de l'eau ne sont pas encore parfaitement connus ni quantifiés. Des travaux doivent être menés pour se doter des connaissances complémentaires. » (Conseil scientifique du comité de bassin Adour-Garonne, 2024)

7. Bibliographie

- Abbott, B.W. *et al.* (2019) 'Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions', *Nature Geoscience*, 12(7), pp. 533–540. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0374-y>.
- ACTeon (2022) 'Etude prospective pour l'adaptation des usages au changement climatique dans le bassin versant de la Drôme – SAGE Drôme 2050. Rapport de phase 2 : diagnostic de la sensibilité du territoire au changement climatique'.
- ACTeon (2024) 'Etude prospective pour l'adaptation des usages au changement climatique dans le bassin versant de la Drôme – SAGE Drôme 2050. Rapport de phase 4 : Elaboration de la stratégie d'adaptation et plans d'actions'. Available at: https://www.riviere-drome.fr/application/files/7517/3461/2108/RAPPORT_SAGE_DROME_2050_phase4__VF.pdf.
- ADEME and OFB (2024a) 'S'adapter au changement climatique dans les filières agricoles : un défi à relever avec les Solutions d'adaptation fondées sur la Nature (SafN). 74 pages'. Available at: <https://www.ofb.gouv.fr/le-projet-life-integre-artisan/documentation-life-artisan/sadapter-au-changement-climatique-dans>.
- ADEME and OFB (2024b) 'S'adapter au changement climatique dans les filières sylvicoles : un défi à relever avec les Solutions d'adaptation fondées sur la Nature (SafN). 68 pages'. Available at: <https://www.ofb.gouv.fr/le-projet-life-integre-artisan/documentation-life-artisan/sadapter-au-changement-climatique-dans-la>.
- Allain, S., Plumecocq, G. and Burger-Leenhardt, D. (2019) 'Résoudre les déséquilibres en eau des territoires agricoles : l'efficacité et l'acceptabilité sociale de quatre scénarios à l'épreuve d'un cas d'étude', *Sciences Eaux & Territoires*, (56 HS), p. 1. Available at: <https://doi.org/10.14758/set-revue.2019.hs.05>.
- Alletto, L. and Bustillo, V. (2023) 'Fonctionnement hydrique de sols en Agriculture de Conservation des Sols', *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 13(1), p. 59. Available at: <https://doi.org/10.54800/vbl896>.
- Andréassian, V. (2004) 'Waters and forests: from historical controversy to scientific debate', *Journal of Hydrology*, 291(1), pp. 1–27. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.12.015>.
- Antoine, C. *et al.* (2023) 'Modélisation participative des Solutions Fondées sur la Nature pour la gestion quantitative de l'eau dans le bassin versant de la Seudre', *TSM. Techniques Sciences Méthodes – Génie urbain, génie rural*, 9, pp. 103–120. Available at: <https://doi.org/10.36904/tsm/202309103>.
- Bayala, J. and Prieto, I. (2020) 'Water acquisition, sharing and redistribution by roots: applications to agroforestry systems', *Plant and Soil*, 453(1), pp. 17–28. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04173-z>.
- Bishop, K. *et al.* (2008) 'Aqua Incognita: the unknown headwaters', *Hydrological Processes*, 22(8), pp. 1239–1242. Available at: <https://doi.org/10.1002/hyp.7049>.
- Blöschl, G. *et al.* (2019) 'Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective', *Hydrological Sciences Journal*, 64(10), pp. 1141–1158. Available at: <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1620507>.

Bonhoure, L. (2024) 'Mémoire de master 2 de Louis Bonhoure, "The Sponge Approach: A Critical Analysis of Emerging Water Management Language and its Implications for European Landscapes"'.

Calvin, K. *et al.* (2023) *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.* First. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Available at: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.

Carluer, N. *et al.* (2017) 'Aménager le territoire et gérer les aménagements : les zones tampons sèches et humides, les fossés pour lutter contre les pollutions diffuses par les produits phytosanitaires dans les aires de captage.', *Innovations Agronomiques*, 57, p. 117. Available at: <https://doi.org/10.15454/1.5137822668081328E12>.

Carluer, N. *et al.* (2022) 'EIP-AGRI Focus Group Nature based Solutions for water management under climate change - Minipaper Nature based Solutions as green infrastructures for agricultural water retention, treatment and availability'. Available at: <https://ec.europa.eu/eip/agriculture/en/focus-groups/nature-based-solutions-water-management-under.html>.

Chausson, A. *et al.* (2020) 'Mapping the effectiveness of nature-based solutions for climate change adaptation', *Global Change Biology*, 26(11), pp. 6134–6155. Available at: <https://doi.org/10.1111/gcb.15310>.

Cohen-Shacham, E. *et al.* (eds) (2016) *Nature-based solutions to address global societal challenges*. IUCN International Union for Conservation of Nature. Available at: <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.13.en>.

Conseil scientifique du comité de bassin Adour-Garonne (2024) 'Positionnement du Conseil Scientifique sur l'hydrologie régénérative - Note du 21 mars 2024'. Available at: https://eau-grandsudouest.fr/sites/default/files/2024-10/Note_CS_hydrologie%20r%C3%A9g%C3%A9n%C3%A9rative_0.pdf (Accessed: 30 January 2025).

Convention MODREC-Vesdre (2023) 'Modélisation hydrologique du bassin versant de la Vesdre', *Université de Liège Gembloux Agro-Bio Tech* [Preprint].

CORPEN/Groupe Zones tampons (2007) 'Les fonctions environnementales des zones tampons - Première édition - Les bases scientifiques et techniques des fonctions de protection des eaux'.

Di Maggio, L. (2023) 'Mémoire de Master, Gembloux Agro-Bio Tech - Quel est le potentiel de l'Hydrologie régénérative ? Modélisation sur un bassin versant agricole'. Available at: <http://hdl.handle.net/2268.2/18216>.

Douville, H. *et al.* (2024) 'Call for caution regarding the efficacy of large-scale afforestation and its hydrological effects', *Science of The Total Environment*, 950, p. 175299. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175299>.

Drapier, L. *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 Hydroscience Journal*, p. 1. Available at: <https://doi.org/10.1080/27678490.2024.2341030>.

Drapier, L., Guerrin, J. and Rey, F. (2023) 'Les modalités et enjeux de l'appropriation par les Agences de l'eau du concept de solutions fondées sur la nature appliqué à la gestion de l'eau : le

cas de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse', *TSM. Techniques Sciences Méthodes – Génie urbain, génie rural*, p. 1.

Eeckman, J. *et al.* (2025) 'Hydrologie Régénérative : Méthodologie de quantification des impacts pour les sites pilotes', *Dynamiques environnementales. Journal international de géosciences et de l'environnement*, (56), pp. 1–23.

Eggermont, H. *et al.* (2015) 'Nature-based Solutions: New Influence for Environmental Management and Research in Europe', *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 24(4), pp. 243–248. Available at: <https://doi.org/10.14512/gaia.24.4.9>.

Ellison, D. *et al.* (2017) 'Trees, forests and water: Cool insights for a hot world', *Global Environmental Change*, 43, pp. 51–61. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002>.

European Commission: Directorate-General for Research and Innovation (2015) *Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities: final report of the Horizon 2020 expert group on 'Nature based solutions and re naturing cities': (full version)*. Publications Office of the European Union. Available at: <https://data.europa.eu/doi/10.2777/765301> (Accessed: 29 January 2025).

Fennell, J. *et al.* (2023) 'Assessing the role of location and scale of Nature Based Solutions for the enhancement of low flows', *INTERNATIONAL JOURNAL OF RIVER BASIN MANAGEMENT*, 21(4), pp. 743–758. Available at: <https://doi.org/10.1080/15715124.2022.2092490>.

Gendre, S. *et al.* (2022) 'EIP-AGRI Focus Group Nature-based Solutions for water management under climate change - Minipaper: Nature-based Solutions at the field scale'. Available at: <https://ec.europa.eu/eip/agriculture/en/focus-groups/nature-based-solutions-water-management-under.html>.

Giller, K.E. *et al.* (2021) 'Regenerative Agriculture: An agronomic perspective', *OUTLOOK ON AGRICULTURE*, 50(1), pp. 13–25. Available at: <https://doi.org/10.1177/0030727021998063>.

Grossiord, C. (2020) 'Having the right neighbors: how tree species diversity modulates drought impacts on forests', *New Phytologist*, 228(1), pp. 42–49. Available at: <https://doi.org/10.1111/nph.15667>.

Guerrin, J., Fernandez, S., *et al.* (2023) 'Que font les solutions fondées sur la nature aux politiques de gestion des risques liés à l'eau ?', *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie* [Preprint], (Vol. 14, n°2). Available at: <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.22788>.

Guerrin, J., Serra-Llobet, A., *et al.* (2023) 'Que sont les solutions fondées sur la nature pour la gestion du risque inondation ? Appropriations d'un concept international en France et aux États-unis', *TSM. Techniques Sciences Méthodes – Génie urbain, génie rural*, 10(10), p. 97. Available at: <https://doi.org/10.36904/tsm/202310097>.

Haasnoot, M. *et al.* (2013) 'Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world', *Global Environmental Change*, 23(2), pp. 485–498. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.12.006>.

Habets, F. *et al.* (2018) 'The cumulative impacts of small reservoirs on hydrology: A review', *Science of The Total Environment*, 643, pp. 850–867. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.188>.

Hérivaux, C., Selles, A. and Le Coënt, P. (2023) 'SFN-ESO : Des solutions fondées sur la nature pour une gestion durable des eaux souterraines? Note de cadrage. Rapport final'. Available at: <http://ficheinfoterre.brgm.fr/document/RP-72417-FR>.

Holden, P.B. *et al.* (2022) 'Nature-based solutions in mountain catchments reduce impact of anthropogenic climate change on drought streamflow', *COMMUNICATIONS EARTH & ENVIRONMENT*, 3(1), p. 51. Available at: <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00379-9>.

Jodar, J. *et al.* (2022) 'Artificial recharge by means of careo channels versus natural aquifer recharge in a semi-arid, high-mountain watershed (Sierra Nevada, Spain)', *Science of The Total Environment*, 825, p. 153937. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153937>.

Kassam, A., Friedrich, T. and Derpsch, R. (2019) 'Global spread of Conservation Agriculture', *International Journal of Environmental Studies*, 76(1), pp. 29–51. Available at: <https://doi.org/10.1080/00207233.2018.1494927>.

Keys, P.W., Wang-Erlandsson, L. and Gordon, L.J. (2016) 'Revealing Invisible Water: Moisture Recycling as an Ecosystem Service', *PLOS ONE*, 11(3), p. e0151993. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151993>.

Kumar, P. *et al.* (2021) 'Nature-based solutions efficiency evaluation against natural hazards: Modelling methods, advantages and limitations', *Science of The Total Environment*, 784, p. 147058. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147058>.

Lalonde, M. *et al.* (2024) 'Scientific evidence of the hydrological impacts of nature-based solutions at the catchment scale', *WILEY INTERDISCIPLINARY REVIEWS-WATER*, 11(5). Available at: <https://doi.org/10.1002/wat2.1744>.

Lebon, N. *et al.* (2022) 'A new agro-hydrological catchment model to assess the cumulative impact of small reservoirs', *Environmental Modelling & Software*, 153, p. 105409. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105409>.

Locatelli, L. *et al.* (2015) 'Determining the extent of groundwater interference on the performance of infiltration trenches', *Journal of Hydrology*, 529, pp. 1360–1372. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.047>.

Lucas-Borja, M.E. *et al.* (2019) 'Effects of Different Land Uses (Abandoned Farmland, Intensive Agriculture and Forest) on Soil Hydrological Properties in Southern Spain', *Water*, 11(3), p. 503. Available at: <https://doi.org/10.3390/w11030503>.

Magnier, J. *et al.* (2024) 'Natural/Small Water Retention Measures: Their Contribution to Ecosystem-Based Concepts', *Sustainability*, 16(3), p. 1308. Available at: <https://doi.org/10.3390/su16031308>.

Martin, E.G. *et al.* (2021) 'Assessing the long-term effectiveness of Nature-Based Solutions under different climate change scenarios', *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT*, 794, p. 148515. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148515>.

Martin, E.G., Costa, M.M. and Manez, K.S. (2020) 'An operationalized classification of Nature Based Solutions for water-related hazards: From theory to practice', *ECOLOGICAL ECONOMICS*, 167, p. 106460. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106460>.

Martín-Queller, E. *et al.* (2010) 'Impacts of intensive agricultural irrigation and livestock farming on a semi-arid Mediterranean catchment', *Environmental Monitoring and Assessment*, 167(1), pp. 423–435. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1061-z>.

McElwee, P.D. *et al.* (2025) *IPBES Nexus Assessment: Summary for Policymakers*. Zenodo. Available at: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15082544>.

van Meerveld, I. and Seibert, J. (2024) 'Reforestation effects on low flows: Review of public perceptions and scientific evidence', *WILEY INTERDISCIPLINARY REVIEWS-WATER* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1002/wat2.1760>.

van Meerveld, I. and Seibert, J. (2025) 'Reforestation effects on low flows: Review of public perceptions and scientific evidence', *WIREs Water*, 12(1), p. e1760. Available at: <https://doi.org/10.1002/wat2.1760>.

Meier, R. *et al.* (2021) 'Empirical estimate of forestation-induced precipitation changes in Europe', *Nature Geoscience*, 14(7), pp. 473–478. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00773-6>.

Molénat, J. *et al.* (2023) 'Diversification from field to landscape to adapt Mediterranean rainfed agriculture to water scarcity in climate change context', *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 65, p. 101336. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2023.101336>.

Morris, C.E. *et al.* (2014) 'Bioprecipitation: a feedback cycle linking earth history, ecosystem dynamics and land use through biological ice nucleators in the atmosphere', *Global Change Biology*, 20(2), pp. 341–351. Available at: <https://doi.org/10.1111/gcb.12447>.

Morris, C.E. (2018) 'Phytobiomes Contribute to Climate Processes that Regulate Temperature, Wind, Cloud Cover, and Precipitation', *Phytobiomes Journal*, 2(2), pp. 55–61. Available at: <https://doi.org/10.1094/PBIOMES-12-17-0050-P>.

Neary, D.G., Ice, G.G. and Jackson, C.R. (2009) 'Linkages between forest soils and water quality and quantity', *Forest Ecology and Management*. 258: 2269-2281., pp. 2269–2281. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.05.027>.

Nesshöver, C. *et al.* (2017) 'The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective', *Science of The Total Environment*, 579, pp. 1215–1227. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.106>.

OECD (2020) *Nature-based solutions for adapting to water-related climate risks (OECD Environment Policy Papers 21)*., OECD. Available at: <https://doi.org/10.1787/2257873d-en> (Accessed: 29 January 2025).

Oudin, L. *et al.* (2018) 'Hydrological impacts of urbanization at the catchment scale', *Journal of Hydrology*, 559, pp. 774–786. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.064>.

Pelet, J. and Rieu, G. (2023) 'Les solutions fondées sur la nature dans les territoires littoraux : une adaptation au changement climatique sans transformation ?', *Développement durable et territoires* [Preprint], (Vol. 14, n°2). Available at: <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.23118>.

Piscart, C. *et al.* (2009) 'Effects of intense agricultural practices on heterotrophic processes in streams', *Environmental Pollution*, 157(3), pp. 1011–1018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.10.010>.

Rey, F. *et al.* (2023) 'Les solutions fondées sur la nature : quelles recherches pour répondre aux défis de la gestion de l'eau ?', *Techniques Sciences Méthodes*, 9, pp. 59–69. Available at: <https://doi.org/10.36904/tsm/202309059>.

- Rockström, J. *et al.* (2024) 'Malin Falkenmark: Water pioneer who coined the notion of water crowding and coloured the water cycle', *Ambio*, 53(5), pp. 657–663. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13280-024-01989-7>.
- Rouzies, E., Lauvernet, C. and Vidard, A. (2024) 'Comparison of different ensemble assimilation methods in a modular hydrological model dedicated to water quality management', *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, pp. 1–33. Available at: <https://doi.org/10.5194/hess-2024-219>.
- Rudi, G. *et al.* (2020) 'Multifunctionality of agricultural channel vegetation : A review based on community functional parameters and properties to support ecosystem function modeling', *Ecohydrology & Hydrobiology*, 20(3), pp. 397–412. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2020.03.004>.
- SAGE Drôme (2024) 'Note SAGE Drôme 2050 - Stratégie du bassin versant de la Drôme pour l'adaptation des usages au changement climatique dans le bassin versant de la Drôme'. Available at: <https://www.riviere-drome.fr/actions-etudes/les-etudes/SAGEDROME2050>.
- Seddon, N. *et al.* (2020) 'Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges', *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 375(1794), p. 20190120. Available at: <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0120>.
- Selles, A. *et al.* (2023) 'Des solutions fondées sur la nature pour une gestion durable des eaux souterraines ? Une revue des effets hydrogéologiques', *Techniques Sciences Méthodes*, pp. 71–101. Available at: <https://doi.org/10.36904/tsm/202309071>.
- Soulis, K.X., Dercas, N. and Papadaki, Ch. (2015) 'Effects of forest roads on the hydrological response of a small-scale mountain watershed in Greece', *Hydrological Processes*, 29(7), pp. 1772–1782. Available at: <https://doi.org/10.1002/hyp.10301>.
- Spongescapes consortium (in press) 'Deliverable 1.1 : Critical review of existing knowledge on sponge functions for different climatic zones, soils and land uses in Europe'.
- Tournebize, J. *et al.* (2024) 'Prevention and management of plant protection product transfers within the environment: A review', *Environmental Science and Pollution Research* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35496-9>.
- Wahl, N.A. *et al.* (2004) 'Effects of conventional and conservation tillage on soil hydraulic properties of a silty-loamy soil', *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 29(11), pp. 821–829. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2004.05.009>.
- WWAP / ONU-Eau (2018) *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2018 : les solutions fondées sur la nature pour la gestion de l'eau*. Available at: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261466> (Accessed: 29 November 2024).
- Yeomans, P.A. (1958) 'The Challenge of Landscape - The Development and Practice of Keyline'.
- Yimer, E.A. (2024) 'The underexposed nature-based solutions: A critical state-of-art review on drought mitigation', *Journal of Environmental Management* [Preprint].
- Zhu, X. *et al.* (2020) 'Reductions in water, soil and nutrient losses and pesticide pollution in agroforestry practices: a review of evidence and processes', *Plant and Soil*, 453(1), pp. 45–86. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04377-3>.

8. Annexes

8.1. Références principales étudiées pour la rédaction de la synthèse

Tableau 5 - Tableau de présentation des références principales étudiées pour la rédaction de la synthèse (source : autrice)

Référence, revue et discipline(s)	Type de publication, sujet traité, méthodes
LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE	
<p>(Alletto and Bustillo, 2023)</p> <p><i>Agronomie, Environnement & Sociétés</i></p> <p>Agronomie</p>	<p>Article de recherche</p> <p>Fonctionnement hydrique de sols en Agriculture de Conservation des Sols</p> <p>Expérimentations conduites sur 7 sites différents localisés dans le sud du bassin Adour-Garonne (mesures des propriétés physiques et observations du développement racinaire sur des parcelles agricoles en labour ou en AC)</p>
<p>(Andréassian, 2004)</p> <p><i>Journal of Hydrology</i></p> <p>Hydrologie, (histoire)</p>	<p>Article de synthèse</p> <p>Controverse historique et débats scientifiques autour des impacts hydrologiques des forêts</p>
<p>(Blöschl et al., 2019)</p> <p><i>Hydrological Sciences Journal</i></p> <p>Hydrologie</p>	<p>Article de synthèse</p> <p>23 problèmes non résolus en hydrologie</p> <p>Contributions de 230 scientifiques (via une consultation publique en ligne et des ateliers de coconstruction de la synthèse)</p>
<p>(Eeckman et al., 2025)</p> <p><i>Dynamiques environnementales. Journal international de géosciences et de l'environnement</i></p> <p>Hydrologie</p>	<p>Article de recherche</p> <p>Méthodologie de quantification des impacts pour des sites pilotes en Hydrologie Régénérative</p>
<p>(Ellison et al., 2017)</p> <p><i>Global Environmental Change</i></p> <p>Interdisciplinaire, sciences de l'environnement</p>	<p>Article de recherche</p> <p>Effets des arbres et des forêts sur le climat et l'eau (fonctions des forêts, interventions dans les cycles du carbone, cycles hydriques et énergétiques)</p> <p>Synthèse de différents travaux de recherche</p>
<p>(Kumar et al., 2021)</p> <p><i>Science of the Total Environment</i></p> <p>Sciences de l'environnement</p>	<p>Revue systématique</p> <p>Avantages et limites des méthodes de modélisation pour évaluer l'efficacité de solutions fondées sur la nature face à des aléas naturels</p> <p>Recherche bibliographique systématique (Scopus, Google Scholar, Web of Science, Science Direct), sélection de 298 articles. Analyse comparative des différentes méthodes et modèles utilisés, avec une catégorisation par type d'aléas naturels.</p>
<p>(Lalonde et al., 2024)</p> <p><i>Wiley Interdisciplinary Reviews : Water</i></p>	<p>Revue systématique</p> <p>Impact hydrologique des solutions basées sur la nature à l'échelle du bassin versant</p>

Hydrologie	Recherche bibliographique systématique (Web of Science) ; 133 études sélectionnées
(Molénat et al., 2023) <i>Current Opinion in Environmental Sustainability</i> Hydrologie, Agronomie	Article de synthèse La diversification (de la parcelle au paysage) comme levier d'adaptation de l'agriculture pluviale méditerranéenne aux pénuries d'eau dues au changement climatique et aux pressions anthropiques.
(Selles et al., 2023) <i>Techniques Sciences Méthodes</i> Hydrogéologie	Article de synthèse Revue des effets hydrogéologiques des solutions fondées sur la nature appliquées à la gestion durable des eaux souterraines
(van Meerveld and Seibert, 2024) <i>Wiley Interdisciplinary Reviews : Water</i> Hydrologie	Article de synthèse Revue sur les perceptions du grand public et éléments de preuves scientifiques des effets de la reforestation sur les faibles débits.
(Zhu et al., 2020) <i>Plant Soil</i> Ecologie végétale, sciences du sol, hydrologie	Revue systématique Preuves et processus par les pratiques agroforestières permettent de limiter les pertes d'eau, de sol et d'éléments nutritifs, ainsi que la pollution par les pesticides Recherche bibliographique extensive (Scopus, Google Scholar, Web of Science, Science Direct) ; 83 études de cas sélectionnées pour approfondissement
LITTÉRATURE « GRISE »	
(ADEME and OFB, 2024a, 2024b)	Productions de l'ADEME et de l'OFB dans le cadre du projet Life Artisan, sur les SFN pour l'adaptation au changement climatique dans les filières agricoles et sylvicoles
(Carluer et al., 2022)	Mini-article du focus group EIP-AGRI sur les SFN pour la gestion de l'eau sous changement climatique : les SFN comme infrastructures vertes pour la rétention, le traitement et la disponibilité de l'eau agricole
(Conseil scientifique du comité de bassin Adour-Garonne, 2024)	Note de position du conseil scientifique du comité de bassin Adour-Garonne sur l'hydrologie régénérative
(Convention MODREC-Vesdre, 2023) ; (Di Maggio, 2023)	Rapport de la modélisation hydrologique du bassin versant de la Vesdre et de différents scénarios d'aménagements (Belgique) ; mémoire de master sur la modélisation de keylines sur un sous-bassin versant agricole de la Vesdre
(Gendre et al., 2022)	Mini-article du focus group EIP-AGRI sur les SFN pour la gestion de l'eau sous changement climatique : les SFN à l'échelle de la parcelle
(Hérivaux, Selles and Le Coënt, 2023)	Rapport du projet de recherche SFN-ESO sur les solutions fondées sur la nature appliquées à la gestion durable des eaux souterraines
(Spongescapes consortium, in press)	Note de synthèse sur la connaissance existante sur les fonctions éponges pour différentes régions climatiques, types de sols et usages en Europe
(WWAP / ONU-Eau, 2018)	Rapport mondial des nations unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2018 : les solutions fondées sur la nature pour la gestion de l'eau
<i>NWRM.eu</i>	Catalogue en ligne des mesures naturelles de rétention d'eau, avec des fiches par mesures, des études de cas et des tables de bénéfices.
<i>OPTAIN.eu</i>	Projet européen sur les mesures naturelles de retentions d'eau dans des petits bassins versants agricoles. Livrables, webinaires sur les MNRE et leur modélisation.

8.2. Mots-clés utilisés lors des recherches bibliographiques

Des recherches bibliographiques dans le moteur de recherche Web of Sciences, réalisées entre le 28/10/2025 et le 27/11/2025 ont permis d'identifier certaines publications scientifiques étudiées dans cette synthèse (cf. présentation de la méthode en partie 2).

Chaque combinaison était proposée pour le titre de la publication, l'abstract et les mots-clés de l'auteur (author keywords) (utilisation de OR).

1. "nature based solutions" OR "nature inspired solutions" OR "solutions fondées sur la nature" OR "NBS" OR "ecosystems services" OR "ecosystem based adaptation" OR "green infrastructure" OR "natural water retention measures"
2. (hydr* OR Water* OR groundwater* OR "ground water*") AND (resilien* OR recharge OR adaptation OR infiltra* OR retention OR quantit* OR management OR ressource conservation)
3. (watershed OR area OR river OR basin OR catchment OR hillslope) AND (rural OR mediterranean* OR mountain* OR extrem*) AND (climat* OR hydrology)
4. "natural risks" OR "mudflow" OR "flooding" OR "landslide" OR "runoff" OR "erosion" OR "drought" OR "dry"
5. model* OR asses* OR evalu* OR caracteri* OR perform* OR effectiv* OR impact OR "knowledge gap" OR controvers* OR questions OR limits OR uncertainties
6. not urban*
7. **#1 AND (#2 OR #3 OR #4) AND #5 AND #6**

Les articles jugés pertinents pour le travail de synthèse mené ont été sélectionnés à partir des titres et abstracts, parfois aussi selon les dates récentes de publication, le nombre de citations, ou une lecture rapide du contenu de l'article.

Recherche annexe réalisée le 04/02/25 sur WoS en lien avec la partie 3.1.3, pour recenser le nombre de publication sur les solutions fondées sur la nature en fonction des enjeux qui y sont associés :

("nature-based solutions" OR NBS) AND (cities OR city OR urban): 2871 résultats

("nature-based solutions" OR NBS) AND (flood* OR fluvial* OR river) : 1304 résultats

("nature-based solutions" OR NBS) AND (littoral* OR coast*) : 737 résultats

("nature-based solutions" OR NBS) AND (drought* OR dry*) : 529 résultats

("nature-based solutions" OR NBS) AND (rural) : 486 résultats

8.3. Guide utilisé pour la conduite des entretiens semi-directifs

Le guide d'entretien a été adapté en fonction de la personne interrogée, son domaine d'expertise, et du déroulé de l'entretien.

INTRODUCTION

- Quel est votre parcours, votre expertise ? Quand vous êtes-vous intéressé à cette thématique ? Pour quelles raisons, dans quel contexte ? Des exemples de projets passés, en cours, prévus ?

TERMINOLOGIE ET CADRAGE

- Quels termes utilisez-vous pour qualifier les « moyens » d'augmenter la rétention d'eau dans les sols et têtes de bassin versant, dans vos recherches ou votre projet ?
 - o Quels autres termes sont utilisés dans la littérature que vous consultez / par vos collègues / par des gestionnaires ?
 - o Lequel trouvez-vous le plus pertinent ? ou au contraire lesquels vous ne souhaitez pas utiliser ? Pourquoi ?
 - o En particulier, que pensez-vous de : Solutions fondées sur la nature ; Mesures naturelles de rétention d'eau ; Hydrologie régénérative
 - o Que pensez-vous de la multiplication de ces terminologies et concepts ?
- Quels sont vos objets de recherche plus précisément ? Par exemple :
 - o Zones humides
 - o (Re)Boisement, (re)végétalisation
 - o Récupération de l'eau (water harvesting) : petites retenues, micro-barrages, tranchées d'infiltration, canaux, terrasses, etc.
 - o Pratiques et infrastructures agroécologiques, etc.
 - o Autres :
- A quelle échelle regardez-vous les effets de ces « mesures » ?
- A quels enjeux, processus, interactions, phénomènes bio-physiques vous intéressez-vous principalement ?
 - o Humidité du sol
 - o Infiltration
 - o Évapotranspiration
 - o Ruissellement
 - o Phénomènes d'érosion
 - o Transport sédimentaire
 - o Recharge d'aquifères
 - o Soutien du débit des cours d'eau
 - o Autres :

- Comment les étudiez-vous ? Avec quelles méthodes (instrumentation, modèles, expérimentation, etc.) ?
- Quelles sont vos questions de recherche ?
- Travaillez-vous sur les impacts hydrologiques quantitatifs de telle ou telle solution ? A quelle échelle ? de l'évaluation des processus physiques à petite échelles, au bilan hydrique individuel ou global, jusqu'à fonctionnement hydro(géo)logique d'un bassin versant.
 - Qu'en savez-vous ?
 - Ce que vous ne savez pas ? ce qu'il manque ?

ETAT DE LA CONNAISSANCE

- D'après vous, quelles sont pour vous les **connaissances « stabilisées »**, mobilisables par les gestionnaires ? Ce sur quoi on peut « avoir confiance » ?
 - Sur les effets d'une mesure / d'un objet ?
 - Sur les effets sur un type de milieu particulier ? ex : terrain agricole, forêt, cours d'eau.
 - Sur les effets combinés de plusieurs mesures / objets ?
- Quels sont pour vous les **facteurs principaux qui influencent les effets** de ces mesures ? Avez-vous des exemples concrets ?
 - Climat : y a-t-il un conditionnement climatique pour l'efficacité de ces mesures ? Sont-elles adaptées pour certains climats, ou régimes hydrologiques uniquement ?
 - Sol et géologie : sur quelles caractéristiques faut-il être vigilant ?
 - Géographie / localisation : y a-t-il des emplacements optimaux pour ces mesures ? si oui lesquels (têtes de bassin versant ?) ? Ou faut-il multiplier à l'échelle du BV ?
 - Echelle de mesure : y a-t-il des effets distincts, voire contradictoire, selon l'échelle à laquelle on les évalue (ex : parcelle vs bassin vs cours d'eau) ?
- Quels « **risques « potentiels** identifiez-vous en lien avec ces mesures ? Quels effets négatifs possibles ?
 - Discontinuités hydrologiques ou sédimentaires
 - Eau dans plantes : augmentation de l'évapotranspiration ? → perte pour cours d'eau et nappe ?
 - Eau dans sol : effet sur l'aval ? → cours d'eau en étiage ? autres usages ?
 - Autres risques ?
- Quelle connaissance avez-vous de ces risques ? Quel degré de vigilance faut-il avoir selon vous ? Identifiez-vous des personnes ou références clés ?
- **Quels co-bénéfices** identifiez-vous (biodiversité, qualité eau, paysage, etc.) ? Sur lesquels insisteriez-vous ? Quelles (in)certitudes sur ces autres effets ? Identifiez-vous des personnes ou références clés ?
- **Evaluation des effets (hydrologiques quantitatifs plutôt) à travers la MODELISATION :**
 - Comment évaluer les effets de la multiplication et/ou de la combinaison de ces mesures à l'échelle d'un (sous)-bassin hydrographique ? L'un pose-t-il plus problème que l'autre ?

- Quelle expérience et connaissance en avez-vous ?
 - Avec quels modèles (ou types de modèles) êtes-vous familiers (ex : MIKE-SHE, SWAT, etc. Hydrologiques, hydrogéologiques ou plus « complets ») ? dans quels contextes ? à quelle échelle ?
 - Quels modèles sont pour vous adaptés, quelles sont leurs limites ?
 - Pour vous, peut-on se passer de la modélisation pour évaluer les effets ? Si oui, quelles méthodes, avec quelles limites ? (ex : mesures et suivi avant et après projet)
- Avez-vous en tête des projets spécifiques ? En particulier, des projets de modélisation ou de mise en oeuvre « à grande échelle » ? Identifiez-vous des références clés ?
 - Quels « trous » / manque / angles morts dans la connaissance ?
 - Quelles **principales zones d'incertitudes** identifiez-vous ? Parmi celles citées, comment les préciseriez-vous ? En voyez-vous des complémentaires ?
 - Effet de la végétation-hydrologie (forêt en particulier, végétation ligneuse plus largement)
 - Évapotranspiration réelle dans les modèles hydrologiques
 - Connectivité des écoulements
 - Représentation des extrêmes hydro/météo
 - Autres :
 - Quels **fronts de recherche** identifiez-vous ? Parmi ceux citées, comment les préciseriez-vous ? En voyez-vous des complémentaires ?
 - Modélisation de l'usage et occupation du sol dans les modèles hydrologiques
 - Autres :
 - Quels débats et/ou **controverses scientifiques** identifiez-vous ? Parmi celles citées, comment les préciseriez-vous ? En voyez-vous des complémentaires ?
 - Effets de la végétation sur les précipitations et transferts météo (forêt en particulier)
 - Effet (re)forestation sur recharge
 - Autres :
 - Identifiez-vous des références clés ?

OUVERTURE : opérationnalisation et accompagnement

- Vos travaux sont-ils proches de l'application / opérationnalisation ?
- Travaillez-vous avec des acteurs opérationnels ?
 - Qui ? Sur quoi ? Depuis quand ?
 - Quelles sont leurs demandes ?
 - En quoi vos travaux peuvent les accompagner ?
 - Que leur manque-t-il d'après vous ?
- Pour vous, quels sont les enjeux « opérationnels » de production de connaissance sur ce sujet ?

- Quel est votre discours et « positionnement » en tant que scientifique vis-à-vis des acteurs opérationnels :
 - o Comment répondez-vous aux interrogations ?
 - o Comment les accompagner-vous ?

- Avez-vous déjà entendu la notion de « solution (ou mesure) sans regret » ?
 - o L'utilisez-vous vous-même ?
 - o Qu'en pensez-vous ?
 - o Comment la définiriez-vous ?

- Avez-vous entendu parler de l'association « Pour une hydrologie régénérative » ? Qu'en pensez-vous ?

8.4. Extraits de la revue de littérature de Lalonde *et al.* (2024) : méthode, références étudiées et tableau d'évaluation des effets hydrologiques

3 | METHODOLOGY

This scoping review follows a comprehensive approach to map and synthesize the existing literature on the hydrological impacts of NbS. First, we develop an NbS typology to guide the review process. Then, a comprehensive review of key literature is conducted using the [Web of Science database](#). To this end, a search string was developed that covers the previously defined NbS interventions types (Table 2) and their synonyms including all hydrological key components of surface, runoff, baseflow, infiltration, evapotranspiration, floods and droughts, and storage and residence time, as follows: (TI=(Nature-based-solution*) OR TI=(Nature based solution*) OR TI=(NbS) OR TI=(reforestation) OR TI=(afforestation) OR TI=(forest conservation) OR TI=(constructed wetland*) OR TI=(wetland conservation) OR TI=(wetland restoration) OR TI=(water harvesting) OR TI=(small depression*) OR TI=(diversion canal*) OR TI=(trenches) OR TI=(gullies) OR TI=(ditches) OR TI=(terrace*)) AND (TI=(hydrology) OR TI=(runoff) OR TI=(streamflow) OR TI=(baseflow) OR TI=(discharge) OR TI=(transpiration) OR TI=(evapo*) OR TI=(infiltration) OR TI=(drought*) OR TI=(flood*) OR TI=(storage) OR TI=(residence)).

The search string identified a total of **1169 scientific peer-reviewed** articles from research across the globe. As a second step, all articles underwent a thorough manual examination of title and abstract, and a final selection was made based on a full-text analysis. This procedure resulted in a total of **133 studies, most of them located in the Hindu Kush Himalaya, South Africa, Peru, the United States, and Alaska** (Figure 1). All of the articles identified were synthesized according to our defined NbS typology and hydrological key components and processes analyzing the current state of knowledge as well as the related gaps.

TABLE 1 Definitions of nature-based solutions (NbS).

Nature-based solutions (NbS) for adapting to water related risks (OECD, 2020)	NbS are measures that protect, sustainably manage or restore nature, with the goal of maintaining or enhancing ecosystem services to address a variety of social, environmental, and economic challenges.
Nature-based solutions and re-naturing cities (European Commission, Directorate General for Research and Innovation, 2015)	NbS are actions that are inspired by, supported by, or copied from nature. They have tremendous potential to be energy and resource-efficient and resilient to change: but to be successful, they must be adapted to local conditions.
Nature-based solutions for water (WWAP, 2018)	NbS are inspired and supported by nature and use, or mimic, natural processes to contribute to the improved management of water. The defining feature of an NbS is, therefore, not whether an ecosystem used is 'natural' but whether natural processes are being proactively managed to achieve a water-related objective.
Water and climate change (WWAP, 2020)	NbS which are inspired and supported by nature and which use or mimic natural processes, can contribute to the improved management of water while providing ecosystem services as well as a wide range of secondary co-benefits, including adaptation, mitigation and resilience to climate change.
Nature-based solutions to address global societal challenges (Cohen-Shacham et al., 2016)	NbS are actions to protect, sustainably manage, and restore natural and modified ecosystems in ways that address societal challenges effectively and adaptively, to provide both human well-being and biodiversity benefits.
Global standard for nature-based solutions (IUCN, 2020a)	Criteria: <ol style="list-style-type: none"> 1. effectively address societal challenges, 2. are informed by scale, 3. result in a net gain to biodiversity and ecosystem integrity, 4. are economically viable, 5. are based on inclusive, transparent, and empowering governance processes, 6. equitably balance trade-offs between achievement of their primary goal(s) and the continued provision of multiple benefits, 7. are managed adaptively, based on evidence, 8. are sustainable and mainstreamed within an appropriate jurisdictional context.

Diversion canals	Canals transporting water from a stream across hillslope to enhance infiltration and likely to supply small depression.	(Cárdenas Panduro, 2020; Ertsen & Van Der Spek, 2009; Ferreira et al., 2020; Kumar et al., 2010; Ochoa-Tocachi et al., 2019)
Infiltration trenches	Excavations that are carried out on slopes in the form of channels of rectangular or trapezoidal section, which are built at contour lines to stop the runoff of rainwater.	(Abu-Zreig et al., 2020; Ahmed et al., 2015; Bergman et al., 2011; Błażejowski et al., 2018; Campisano et al., 2011; Cornelis et al., 2012; Cubides & Santos, 2018; De Carlo et al., 2020;

TABLE 2 (Continued)

NbS types	Solutions	Definitions	Articles
			Fach & Dierkes, 2011; Fan et al., 2022; Freni et al., 2009; Freni & Mannina, 2019; Greggio et al., 2018; Guzman et al., 2017; Heilweil & Watt, 2011; Kumar et al., 2022; LaFevor & Ramos-Scharrón, 2021; B. Locatelli et al., 2020; L. Locatelli et al., 2015; Lopes Bezerra et al., 2022; Mullins et al., 2020; Reinstorf, 2017; Somers et al., 2018; Taye et al., 2015; Widomski et al., 2010)
	Terraces	Sloped surface cut into flat layers by vertical or oblique walls usually made with stones.	(Agnihotri & Yadav, 1995; Arnáez et al., 2015; J. Bai et al., 2019; Baumhardt et al., 2020; Gallart et al., 1994, 1997; Gardner & Gerrard, 2003; Kendall & den Ouden, 2008; Khelifa et al., 2017; Li et al., 2023; Llorens et al., 1992; Lü et al., 2009; Madramootoo & Norville, 1993; Meerkerk et al., 2009; Qian et al., 2014; Romero-Díaz et al., 2019; Willems et al., 2021)

8.5. Tableau issu de Kumar *et al.* (2021), synthétisant les avantages et limites des modèles identifiés par les auteurs

Table 6
Outline of the advantages and limitations of numerical models that can evaluate NBS against different HMHs.

Models	Advantage	Disadvantage	Potential application	Potential improvement	Reference
Surface/subsurface models, e.g., • MIKE-SHE • SWAT • MODFLOW • WRF • HEC-RAS • ParFlow-TREES • ACRU • SIMGRO	<ul style="list-style-type: none"> Incorporate almost all relevant surface and subsurface hydrological process Can simulate large-scale NBS planning due to normally great capacity in representing the variations of processes and features spatially 	<ul style="list-style-type: none"> Coarse in spatial and temporal resolutions Cannot simulate urban drainage systems (UDS) Cannot simulate the detailed geometry and design features of NBS Data intensive 	<ul style="list-style-type: none"> Evaluate the performance and efficiency of NBS against HMHs in the catchment scale Evaluate the optimal allocation of NBS in the catchment scale Evaluate the performance and efficiency of NBS against HMHs in the catchment scale Evaluate the optimal allocation of NBS in the catchment scale 	<ul style="list-style-type: none"> Allow finer spatial and temporal resolutions Develop built-in NBS modules to evaluate NBS more flexibly Coupling with hydraulic modes to simulate UDS. 	Ewen et al. (2000) DHI (2007) Kim et al. (2008) Markstrom et al. (2008) McKane et al. (2014)
Green NBS-specific surface models, e.g., • SWMM-LID-GW • SWMM • GIFMOD • ENVI-met • FUNWAVE-TVD • SSHV-2D • tRIBS-VEGGIE • BROOK90 • SWAN • ADCIRC • XBeach	<ul style="list-style-type: none"> Can simulate and evaluate the green-NBS and SUDS at catchment scale Power in runoff simulation and routing Considers two-way interaction between green NBS and groundwater Flexible to simulate NBS design and performance evaluation 	<ul style="list-style-type: none"> Does not simulate groundwater flow and requires groundwater data as direct input SWMM and SWINGO—VFSMOD can only simulate an individual NBS by assuming homogeneous soil profile Cannot represent some design feature of NBS and their efficiency evaluation 	<ul style="list-style-type: none"> Evaluate the optimal allocation of NBS in the catchment scale 	<ul style="list-style-type: none"> Coupled with a subsurface hydrological model Improvement to consider multiple NBS in SWMM and SWINGO-VFSMOD and overlap groundwater module To enable more flexible NBS designs and evaluations 	Massoudieh et al. (2017) Zhang et al. (2018) Roldin et al. (2013) Locatelli et al. (2015) Fox et al. (2018)
Variably saturated models, e.g., • LISFLOOD-FP • HYDRUS • Flood Modeller • PLAXIS • TELEMAC	<ul style="list-style-type: none"> Accurately simulate subsurface flows Easily track and visualise subsurface flows Flexible to simulate the detailed geometry of NBS 	<ul style="list-style-type: none"> Simplify the simulation of surface rainfall runoff generation processes Cannot simulate large scale NBS designing and planning 		<ul style="list-style-type: none"> Coupled with a subsurface hydrological model 	Hsieh et al. (2000) Diersch (2005) Simunek et al. (2005)