



Modélisation participative des Solutions Fondées sur la Nature pour la gestion quantitative de l'eau dans le bassin versant de la Seudre

Charles Antoine, Léna Abasq, Sarah Sarah, Jean-Daniel Rinaudo, Jean-Philippe David, Fabien Poussin

► To cite this version:

Charles Antoine, Léna Abasq, Sarah Sarah, Jean-Daniel Rinaudo, Jean-Philippe David, et al.. 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, 2023, 9, pp.103-120. 10.36904/tsm/202309103 . hal-04287195

HAL Id: hal-04287195

<https://hal.science/hal-04287195>

Submitted on 15 Nov 2023

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

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

Modélisation participative des Solutions Fondées sur la Nature pour la gestion quantitative de l'eau dans le bassin versant de la Seudre

Charles ANTOINE*, ACTeon Environment, 5 place Sainte-Catherine – 68000 COLMAR
(c.antoine@acteon-environment.eu / 07 61 91 79 95)

Léna ABASQ, Bureau des Ressources Géologiques et Minières, 5 rue de la Goélette – 86280 SAINT-BENOIT

Sarah LOUDIN, ACTeon Environment, 5 place Sainte-Catherine – 68000 COLMAR

Jean-Daniel RINAUDO, Bureau des Ressources Géologiques et Minières, 1034 rue de Pinville – 34000 MONTPELLIER

Jean-Philippe DAVID, Syndicat Mixte du Bassin de la Seudre, 17 rue de l'électricité – 17200 ROYAN

Fabien POUSSIN, Syndicat mixte des Réserves de Substitution de la Charente-Maritime, 37 rue de l'Alma – 17100 SAINTES

Résumé

Dans un contexte d'accroissement des tensions sur les ressources en eau, exacerbées par le changement climatique, les Solutions Fondées sur la Nature (SFN) ont été mises à l'agenda des politiques de gestion quantitative pour répondre à leurs enjeux écologiques et sociaux. Seulement, la mise en œuvre des SFN à l'échelle territoriale se heurte notamment à des incertitudes sur leurs effets hydrologiques. Dans une perspective exploratoire, l'article évalue le potentiel des SFN pour améliorer la recharge des eaux souterraines et plus globalement la gestion quantitative de l'eau dans le bassin de la Seudre. L'analyse s'appuie sur un exercice de modélisation participative qui alimente l'élaboration du Projet de Territoire pour la Gestion de l'Eau (PTGE). Un ensemble de SFN pertinentes pour le territoire ont d'abord été identifiées sur la base d'une revue de la littérature et de discussions avec les acteurs locaux. Des scénarios de déploiement de ces mesures, traduits sous forme de cartes, ont ensuite été construits au cours d'ateliers participatifs et leur impact sur la recharge sommairement estimé à partir de résultats d'études existantes. Le modèle hydrogéologique du Crétacé du Sud-Charentes développé par le BRGM est ensuite utilisé pour simuler l'impact de ces scénarios sur le fonctionnement des ressources en eau souterraines et des milieux dépendants. L'ensemble de la démarche a mobilisé les acteurs locaux impliqués dans l'élaboration du PTGE au cours d'une série d'ateliers qui ont permis de valider les SFN et les secteurs où les déployer ainsi que les hypothèses de modélisation. Le modèle hydrogéologique a été paramétré pour simuler les chroniques de débit de la Seudre et la piézométrie des aquifères en fonction des gains d'infiltration correspondant aux scénarios de déploiement des SFN sur le territoire. Les résultats de la modélisation ont fait l'objet d'un atelier final pour établir un programme d'actions associé au déploiement des SFN sur le bassin versant au sein du PTGE.

Mots-clés

Solutions Fondées sur la Nature ; Projet de Territoire pour la Gestion de l'Eau ; Participation ;
Modélisation hydrogéologique ; Système d'Information Géographique

Participatory modeling of the impact of Nature-based Solutions on quantitative water management in the Seudre watershed

Abstract

Given the increasing strain on water resources, worsened by climate change, facilitating Nature based Solutions development is high on the agenda of water policies. However, NbS implementation on a territorial scale faces considerable obstacles especially concerning their hydrologic effectiveness. Considering the need for knowledge on this issue, the following paper assesses NbS potential to improve aquifer recharge and more generally quantitative water management in the Seudre watershed. The analysis relies on a participatory modeling framework designed for water planning processes. Nature-based Solutions adapted to the local context and potentially increasing aquifer recharge were identified by a literature review and discussions with local stakeholders. Then, local stakeholders were involved in a participatory development of NBS deployment scenarios using Geographic Information System. The impact of NbS scenarios on surface and groundwater was estimated with a distribute groundwater model. The main steps of the modeling framework were driven by local stakeholders contributing to the process during four workshops. For each Nbs scenario, a specific configuration of the groundwater model was implemented to simulate the impact of the infiltration gains on water levels and flows of the Seudre river. Finally, results were introduced and discussed with stakeholders during the last workshop to build a collective strategy on the development of NbS in water planning.

Keywords

Nature-based Solutions ; Water planning ; Stakeholder participation ; Groundwater modeling ; Geographic Information System

1. Introduction

Sous l'effet du changement climatique, les problématiques de gestion quantitative des ressources en eau montent en puissance avec l'accentuation des phénomènes de sécheresse, la diminution des débits d'été et de la recharge des nappes [GIEC, 2023]. Ces bouleversements hydrologiques risquent d'imposer des restrictions d'usage et des conflits de plus en plus marqués pour le partage de la ressource entre les usagers concurrents.

Dans ce contexte, l'augmentation de la recharge des nappes semble être une option à explorer. Il s'agit d'augmenter le taux d'infiltration des précipitations en vue de maintenir, voire d'augmenter les entrées dans les aquifères. Cette augmentation de la recharge peut se faire par le biais d'infrastructures de recharge artificielle (bassins d'infiltration ou puits d'injection) ou par le biais de Solutions fondées sur la Nature (SFN), reposant principalement sur des modifications de l'occupation du sol et des propriétés de ceux-ci. Les SFN sont définies par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) comme « *des actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés, pour relever directement les enjeux de société de manière efficace et adaptative tout en assurant le bien-être humain et des avantages pour la biodiversité.* » [UICN, 2016].

En effet, plusieurs types de SFN favorisant la recharge des aquifères sont cités dans de nombreux rapports internationaux [WILD, 2020 ; COHEN-SHACHAM *et al.*, 2016] comme des leviers d'adaptation au changement climatique à intégrer dans les politiques de l'eau. Par exemple, la restauration hydromorphologique permet d'augmenter les interactions entre nappe et rivière augmentant ainsi les apports vers ces dernières lorsque les rivières sont en hautes eaux. Par ailleurs, la mise en place de haies et les pratiques agricoles de conservation des sols permettent d'augmenter la teneur en matière organique des sols et leur porosité, qui amplifient localement l'infiltration [BLANCO-CANQUI et RUIS, 2020 ; WALLACE *et al.*, 2021]. La restauration de zones humides, notamment de tourbières, constitue un autre exemple de SFN envisagée pour améliorer la recharge des nappes et les débits d'été du fait de leur importante porosité et leur capacité à ralentir les écoulements [AHMAD *et al.*, 2020 ; PARAN, 2019].

En France, les instructions relatives à l'élaboration des Projets de Territoire pour la Gestion de l'Eau (PTGE¹) intègrent les SFN dans le répertoire des options à mobiliser, comme alternative aux infrastructures de stockage². Pourtant, malgré ces incitations, l'intégration des SFN dans les programmes opérationnels de gestion quantitative reste anecdotique [GITTON *et al.*, 2022].

Dans la plupart des démarches de gestion intégrée des ressources en eau, les mesures mises en place se focalisent sur (i) les mécanismes de partage des ressources disponibles et (ii) la mobilisation de ressources de substitution, envisageant très rarement des solutions visant à augmenter l'infiltration et la recharge à grande échelle. Ceci s'explique par : (1) le manque de connaissance de ces SFN par les

¹ Les PTGE (Projet de Territoire pour la Gestion de l'Eau) sont issus de l'instruction gouvernementale du 7 mai 2019. Ils y sont définis comme « une démarche reposant sur une approche globale et co-construite de la ressource en eau sur un périmètre cohérent d'un point de vue hydrologique ou hydrogéologique. Ils aboutissent à un engagement de l'ensemble des usagers d'un territoire permettant d'atteindre, dans la durée, un équilibre entre besoins et ressources disponibles en respectant la bonne fonctionnalité des écosystèmes aquatiques, en anticipant le changement climatique et en s'y adaptant. »

² Doctrine d'instruction des Projets de Territoire pour la Gestion de l'Eau, 2019, Ministère de la Transition Ecologique

acteurs chargés de la gestion de l'eau ; (2) l'incertitude relative à leur efficacité qui les exclut de fait des solutions considérées par les acteurs locaux ; et (3) des difficultés de mise en œuvre opérationnelle liées à l'interdisciplinarité, aux échelles de temps et à la coordination de nombreux acteurs.

Les acteurs de l'eau sont donc demandeurs d'études pilotes permettant d'en évaluer l'efficacité de manière objective, en utilisant d'abord des outils de modélisation déployés à l'échelle d'un bassin versant puis des démonstrations expérimentales [AL SAYAH *et al.*, 2022]. La crédibilité de ces études pilotes impose d'associer les acteurs de terrain à la conception des scénarios de déploiement de ces SFN, tenant compte des contraintes susceptibles d'en limiter la mise en œuvre. La démarche de modélisation participative présentée dans cet article vise à répondre à ce besoin.

La suite de cet article est organisée comme suit. Le terrain d'étude et la méthodologie sont d'abord exposés (section 2). Les principaux résultats sont ensuite présentés (section 3) et mis en discussion (section 4) dans un contexte plus large.

2. Matériels et méthodes

2.1. Présentation du cas d'étude : l'élaboration du PTGE du bassin versant de la Seudre

Le bassin versant de la Seudre est situé en Charente-Maritime, au nord de l'estuaire de la Gironde et en face de la presqu'île d'Oléron. Il s'agit d'un bassin versant estuarien de 750 km² en très faible pente qui recoupe le périmètre de 67 communes avec une population d'environ 62 000 habitants. La Seudre est un fleuve côtier principalement alimenté par la pluviométrie et le trop-plein des aquifères, particulièrement les nappes libres qualifiées de "nappes d'accompagnement", elles-mêmes rechargées par les précipitations

La chronique des débits observés à Saint-André-de-Lidon montre un changement net de la fréquence des étiages sévères à partir de la fin des années 1980 (*Figure 1*). À partir de cette période, le Débit d'Objectif d'Etiage (DOE) (= 100 L/s³) est très rarement respecté, seulement trois années depuis 1990. Le débit est également descendu régulièrement sous le débit de crise (DCR = 25 L/s) au cours de cette période. Cette récurrence des étiages sévères témoigne de la surexploitation des aquifères d'accompagnement de la Seudre à partir des années 1980, en lien notamment avec la production d'eau potable (secteur touristique), le développement de l'irrigation et la mise en culture de la zone de marais tourbeux alluviaux, qui assurait une rétention d'eau par son importante porosité et son relargage progressif à l'étiage.

³ Cette valeur de DOE, en vigueur au démarrage de la présente étude, a été révisée dans le cadre de la dernière version du SDAGE (2022-2027). Le nouveau DOE de 90 L/s sera appliqué dès l'année 2023.

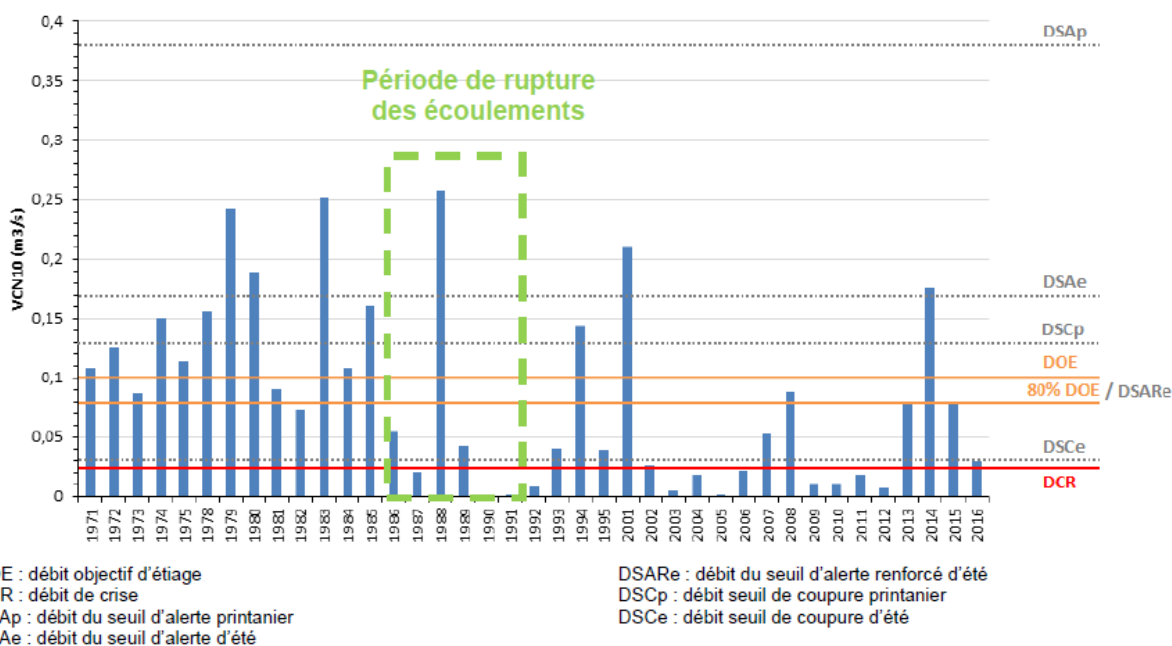


Figure 1 : Evolution des débits minimaux sur 10 jours (VCN10) de la Seudre à Saint-André-de-Lidon

Pour faire face à ces enjeux, un PTGE est en cours d'élaboration sur le bassin [LESCUYER, 2020], porté par le Syndicat Mixte du Bassin de la Seudre (SMBS) et le Syndicat mixte des Réserves de Substitution de la Charente-Maritime (SYRES 17). Il s'inscrit dans la continuité d'une gestion structurelle des prélèvements amorcée avec la déclaration du bassin en zone de répartition des eaux (ZRE) en 1994 et l'instauration de volumes prélevables en 2011 pour remédier au déficit quantitatif. Cette gestion a conduit, au fil des ans, à une forte réduction des volumes prélevables autorisés, avec la perspective de compensation partielle par la construction de retenues de substitution.

Dans le cadre du PTGE, une étude de révision des volumes prélevables a été réalisée en 2019 par le BRGM avec le modèle hydrogéologique MARTHE actualisé à l'échelle des aquifères du Crétacé du Sud Charentes [CASTILLO et BLONDEL, 2021]. Les acteurs du PTGE ont été impliqués dans ce travail de modélisation des volumes prélevables, avec des sessions de formation sur le fonctionnement du modèle et la participation à l'analyse des résultats. Le calcul des volumes prélevables se poursuit, conduisant à affiner le partage de la ressource entre usagers. En parallèle, compte tenu de l'ampleur de la réduction attendue, d'autres solutions qui permettraient notamment d'augmenter la recharge sont à explorer. C'est dans ce contexte que les acteurs ont souhaité savoir si la mise en place de SFN était susceptible de modifier le bilan de la nappe et le débit d'été de la Seudre.

2.2. Vue d'ensemble de la méthode de modélisation participative

La méthode retenue pour l'évaluation du potentiel des SFN pour la recharge des aquifères dans le bassin versant de la Seudre s'articule en 9 étapes (Figure 2).

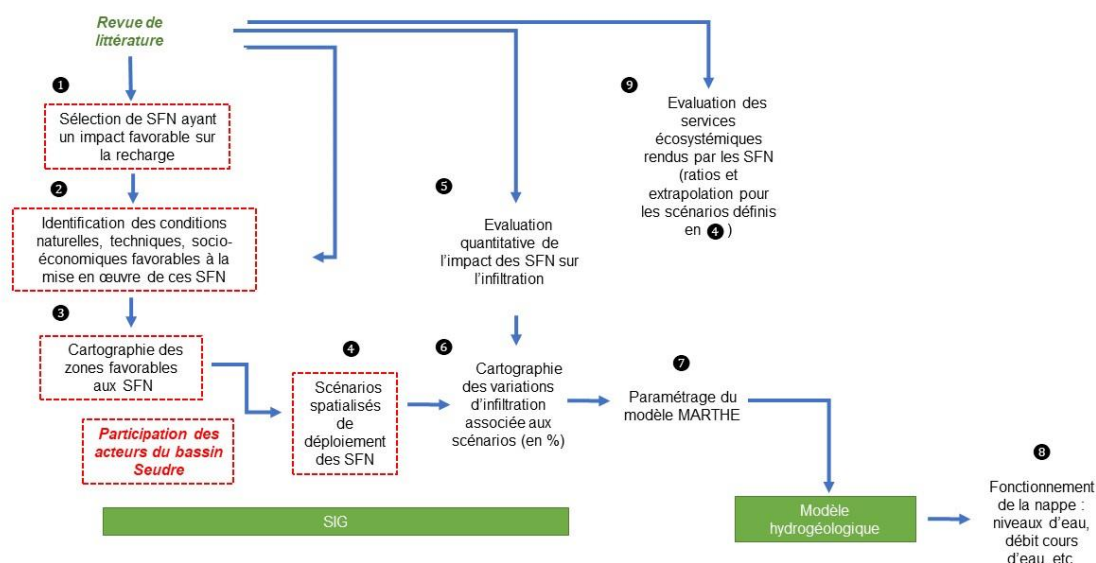


Figure 2 : Schéma méthodologique du processus de modélisation participative

① Sélection de SFN ayant un impact favorable sur la recharge

La revue de littérature et les choix des acteurs du PTGE ont conduit à retenir trois types de SFN à mettre en œuvre potentiellement sur le territoire : les pratiques agricoles de conservation des sols, la restauration d'un maillage arboré et la restauration de zone humide.

Les pratiques agricoles de conservation des sols reposent sur trois principes : une limitation du travail du sol, une couverture des sols permanente et une diversification des cultures. Ces pratiques permettent de favoriser l'accumulation de matière organique en surface des sols et d'améliorer leur porosité biologique, engendrant des gains d'infiltration locaux [BLANCO-CANQUI et RUIS, 2020]. La couverture des sols limite également les phénomènes d'érosion et les transferts de polluants agricoles, tout en limitant les apports d'intrants. Par ailleurs, la limitation du travail du sol est bénéfique en termes d'atténuation du changement climatique, notamment grâce au stockage de carbone qu'elle induit.

La restauration d'un maillage arboré consiste essentiellement à assurer l'entretien des haies existantes et la plantation à grande échelle. Les services écosystémiques fournis par les haies sont multiples. En effet, elles constituent un habitat pour la faune sauvage, en assurant des continuités écologiques sur le principe de la trame verte. Les haies rendent également des services de régulation, par exemple en limitant les phénomènes d'érosion et de ruissellement et les transferts de polluants, en agissant comme brise-vent et source d'ombrage, en stockant du carbone, voire en contribuant au maintien des berges des cours d'eau [VAN VOOREN *et al.*, 2017].

Les zones humides occupent effectivement près de 20% de la superficie du bassin de la Seudre et rendent de nombreux services écosystémiques de support des activités d'ostréiculture et d'élevage en marais, de régulation en tant que zone tampon hydrologique, et des services culturels liés à leur intérêt paysager, leur histoire et leur biodiversité. Parmi les zones humides de la Seudre, les marais tourbeux

alluviaux s'étendent sur 850 hectares de Saint-André-de-Lidon à Corme Ecluse. Il s'agit d'une tourbière fluviogène, dont le fonctionnement a été dégradé à la suite des pratiques de drainage précoce et de la mise en culture de la plaine alluviale. En effet, la mise en culture de la zone humide alluviale a conduit à une minéralisation de l'horizon superficiel de la tourbe et à un tassement de ces sols qui altèrent leurs fonctions écologiques. Dans ce contexte, la restauration de cette zone de marais tourbeux alluviaux par la révision du mode de gestion des ouvrages a été désignée comme un enjeu pour le soutien d'étiage dans le diagnostic du SAGE⁴.

② Identification des conditions favorables à la mise en œuvre des SFN à l'échelle locale

La sélection des SFN à étudier repose notamment sur des critères de potentiel biophysiques : l'amélioration de la recharge et le soutien d'étiage, de services écosystémiques, d'adaptation au contexte pédoclimatique local ; et socio-économiques : impacts des changements de pratiques, emprise foncière, délais opérationnels, faisabilité de l'étude via la méthodologie retenue et les ressources disponibles.

③ Cartographie des zones favorables aux SFN

Afin d'identifier les zones où le déploiement de chaque type de SFN serait le plus intéressant d'un point de vue physique et socio-économique, un score d'intérêt a été construit pour chaque type de SFN intégrant plusieurs critères (*tableau I*).

Tableau I : Critères utilisés pour le calcul du score d'intérêt par maille du modèle MARTHE pour les pratiques agricoles de conservation des sols et la restauration d'un maillage arboré

Critères	Données	Traitement
Cultures sarclées	Registre Parcellaire Graphique	Pourcentage de surface en cultures sarclées par maille
Proximité au réseau hydrographique	BD TOPO IGN	Pourcentage de surface par maille intersectant une zone tampon de 60 m autour du réseau hydrographique
Intensité de prélèvements	BRGM	Moyenne des volumes prélevés par maille
Sensibilité au ruissellement	SMBS	Moyenne des indices de sensibilité au ruissellement par maille

⁴ « La révision de l'actuel mode de gestion des niveaux d'eau dans les marais : une gestion coordonnée et concertée des ouvrages pourrait améliorer la capacité de rétention des tourbes et étaler dans le temps leur capacité de restitution » SAGE Seudre, SMBS, 2018

Réserve utile (Conservation des sols)	IGCS Poitou-Charentes	Moyenne de la réserve utile des sols par maille
Densité de boisements (Maillage arboré)	BD TOPO IGN / SMBS	Moyenne de la surface de boisements par maille

191

192 Pour chaque critère, les valeurs sont classées en niveau d'intérêt⁵ allant de 0 à 4 pour chaque maille
193 du modèle MARTHE, à l'exception du ratio de surface en cultures sarclées compris entre 0 et 1. À noter,
194 les sols à plus forte réserve utile sont ciblés pour les pratiques de conservation des sols, tandis que
195 l'absence de boisements est intégrée comme critère d'intérêt pour la restauration d'un maillage arboré.

196 Le score d'intérêt par maille est la somme des scores d'intérêt de chaque critère, pondérée par le ratio
197 de surface en grandes cultures. Par construction, le score varie donc de 0 à 16.

198 À noter, dans le cas de la restauration de zone humide, un indicateur a été développé par le SMBS pour
199 mesurer l'impact que la restauration pourrait avoir sur le niveau des nappes d'accompagnement et la
200 qualité des eaux de la Seudre. Selon cette analyse, les secteurs les plus stratégiques pour la
201 restauration écologique sont situés dans des zones humides à substrat tourbeux, cultivées en grandes
202 cultures à proximité des périmètres de protection de captage, avec relativement peu de surfaces en
203 herbe et de boisements.

204 **④ Construction de scénarios spatialisés de déploiement des SFN**

205 Pour les pratiques de conservation des sols et la restauration de maillage arboré, un scénario de
206 déploiement a été construit en précisant le pourcentage de conversion d'usage des sols à l'échelle des
207 zones d'intérêt identifiées.

208 Pour la restauration de zone humide, une focalisation sur la zone alluviale de marais tourbeux a été
209 adoptée compte-tenu des enjeux qu'elle représente.

210 **⑤ Evaluation quantitative de l'impact des SFN sur l'infiltration**

211 Une revue de la littérature scientifique a permis d'évaluer sommairement l'impact quantitatif des SFN
212 sur l'infiltration. Ces ordres de grandeur sont utilisés pour estimer les gains d'infiltration associés aux
213 scénarios de déploiement des SFN.

214 **⑥ Cartographie des variations d'infiltration associées aux scénarios**

215 En fonction du niveau de déploiement des SFN défini dans les scénarios pour chaque zone d'intérêt,
216 un gain d'infiltration est calculé pour chaque maille du territoire, permettant de cartographier les gains
217 d'infiltration. Dans le modèle MARTHE, les paramètres de ruissellement/percolation sont fixés à l'échelle
218 de différents ensembles de maille constituant des zones de sol. Pour intégrer les gains d'infiltration au

⁵ La méthode de classification par seuils naturels (*Jenks*) est utilisée pour la classification des valeurs des critères d'intérêt

paramétrage du modèle, un gain d'infiltration moyen à l'échelle des zones de sol est calculé en agrégeant les gains d'infiltration des mailles.

Pour modéliser l'impact des pratiques agricoles de conservation des sols, des réductions de prélèvements pour l'irrigation ont également été appliquées aux prélèvements situés dans les mailles ciblées pour le déploiement de ces pratiques.

7 Paramétrage du modèle MARTHE

MARTHE est un logiciel développé par le BRGM permettant la modélisation des écoulements dans les systèmes aquifères. Le modèle utilisé dans cette étude est issu de l'actualisation du modèle des aquifères du Crétacé du Sud-Charentes sur la période 2000-2018 [ABASQ *et al.*, 2021]. Le modèle calcule la piézométrie des aquifères à un pas de temps mensuel à hebdomadaire à partir d'un maillage de calcul de 500x500 mètres. Ce maillage correspond à la grille utilisée pour l'analyse spatiale du déploiement des SFN sur le territoire. Le modèle MARTHE est alimenté par des données climatiques, topographiques, géologiques, hydrographiques, et des données liées aux usages de l'eau. Le code de calcul Gardénia est intégré au modèle MARTHE pour le calcul journalier des bilans hydro-climatiques dans chaque maille conditionnant la recharge des aquifères. Dans le modèle Gardénia, qui fonctionne comme un modèle réservoir, la recharge est une fonction des paramètres suivants : réserve utile des sols, coefficient de partage ruissellement/percolation, temps de demi-percolation [THIERY, 2014 ; DOUEZ et BICHOT, 2012]

Ce modèle est adapté à la simulation du fonctionnement des aquifères et des cours d'eau à grande échelle, il a été utilisé en l'état pour simuler les effets hydrologiques des SFN mettant en jeu des processus plus locaux et liés aux modifications des propriétés des sols ou des lignes d'eau. Par construction du modèle, les circulations d'eau dans le compartiment sol sont modélisées de manière sommaire, avec notamment une simplification des phénomènes d'évapotranspiration. Les limites du modèle sont donc importantes à considérer dans ce type de configuration.

Du fait de la non-linéarité entre les paramètres de recharge et les variations de l'infiltration, une analyse de sensibilité du cumul d'infiltration par rapport aux variations des paramètres de ruissellement/percolation et de temps de demi-percolation a été réalisée. En résumé, l'augmentation de l'infiltration sur une zone de sol se traduit par une diminution du temps de demi-percolation. Autrement dit, les précipitations atteignent plus rapidement le réservoir souterrain dans les zones de sol concernées par des gains d'infiltration.

Concernant la restauration de la zone alluviale de marais tourbeux, une élévation locale des niveaux d'eau a été proposée pour traduire le réhaussement des eaux en l'absence d'exploitation et de tassement des sols tourbeux et de simuler ainsi une zone tampon hydrologique. En effet, les niveaux des cours d'eau sont modélisés dans MARTHE avec une définition de la charge hydraulique par maille, qui peut être fixée selon la hauteur des ouvrages. Toutefois, une gestion saisonnière des niveaux des ouvrages n'a pas été envisagée dans les différentes simulations pour des raisons techniques.

8 Fonctionnement de la nappe : niveaux d'eau, débit des cours d'eau

L'approche retenue consiste à comparer les simulations des scénarios de déploiement des SFN à la simulation initiale du modèle MARTHE sur la période 2000-2018. Cette période de référence est celle qui a été retenue pour l'actualisation du modèle Crétacé dans l'étude sur les volumes prélevables du bassin versant de la Seudre [ABASQ *et al.*, 2021].

9 Evaluation des services écosystémiques rendus par les SFN

Par définition, les SFN procurent de multiples services écosystémiques, qu'il serait réducteur de cantonner aux seuls effets quantitatifs. Une revue de littérature a été réalisée pour estimer les types de services écosystémiques rendus et leurs ordres de grandeur selon les scénarios de déploiement des SFN.

2.3. La démarche de modélisation participative

La démarche de modélisation participative mise en œuvre repose sur l'articulation d'une série d'ateliers avec le processus de modélisation. À chaque phase du travail de modélisation, les participants aux ateliers étaient amenés à orienter le processus et à arbitrer sur des types de projets, des secteurs géographiques, et des ordres de grandeur de déploiement et d'impact des SFN.

La dimension participative de la modélisation a ainsi permis d'améliorer la transparence de la modélisation en allant au-delà de la représentation du modèle comme une « boîte noire ». La participation des acteurs locaux, notamment des acteurs agricoles, a permis d'intégrer les savoirs et les pratiques locales sur les types de sol, d'exploitation, ainsi que les verrous techniques et les enjeux financiers que peuvent représenter des changements de pratiques.

Sur l'ensemble du processus de modélisation, 4 ateliers d'une demi-journée ont eu lieu avec un panel d'une quinzaine d'acteurs intégrant des collectivités territoriales, des représentants de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, de l'Association Syndicale Autorisée Saintonge Centre, de la Fédération Régionale d'Agriculture Biologique de Nouvelle-Aquitaine et de Nature Environnement 17, des agriculteurs du territoire et un technicien de la Chambre d'Agriculture 17.

Ces ateliers ont été organisés pour permettre (1) la formation des acteurs et le partage de connaissances et de retours d'expérience sur les SFN avant de (2) valider les SFN à modéliser et les critères de territorialisation pour définir les zones d'intérêt. Il s'agit alors de (3) construire des scénarios de déploiement et s'accorder sur les hypothèses de modélisation, puis de (4) partager les résultats et définir un plan d'actions pour le déploiement des SFN au cours d'un dernier atelier.

Pour la construction des scénarios de déploiement des SFN, la méthode retenue a été de définir à dire d'experts les niveaux de déploiement des SFN « minimum » et « maximum » selon les zones d'intérêt, correspondant respectivement à des situations jugées « réaliste » ou « exploratoire » d'après les participants. L'encadrement des niveaux de déploiement permet de réaliser une analyse de sensibilité avec un nombre de simulations limité, tout en définissant un potentiel de déploiement. Ces niveaux de déploiement ont été définis par les participants de manière unanime.

3. Résultats

3.1. Les SFN permettant d'améliorer la recharge et leur efficacité

Afin de quantifier les services écosystémiques fournis par les SFN, leurs effets hydrologiques sont exposés, mais également le stockage de carbone qui apparait en tant que co-bénéfice. Les résultats de la revue de littérature sont synthétisés avec les hypothèses de travail pour la modélisation retenues au fil des ateliers (*tableau II*).

Tableau II : Effets hydrologiques et stockage de carbone des différents types de SFN

Type de SFN	Effets hydrologiques	Stockage de carbone (t C ha ⁻¹ an ⁻¹)	Hypothèses de travail
Conservation des sols	Gain d'infiltration : +43% [BLANCO-CANQUI et RUIS, 2020]	0,2 [MEURER <i>et al.</i> , 2018]	Gain d'infiltration : +30% Réduction de prélèvement : -10%
Restauration d'un maillage arboré	Gain d'infiltration non quantifiés [WALLACE <i>et al.</i> , 2021 ; HOLDEN <i>et al.</i> , 2018 ; MEROT, 1999]	0,75 [PELLERIN <i>et al.</i> , 2021]	Gain d'infiltration : +80% ⁶
Restauration de tourbière	Interaction nappe-rivière [PARAN, 2019]	25 [BONN <i>et al.</i> , 2014]	Elévation des niveaux d'eau au droit des ouvrages

Dans la suite, les résultats sont détaillés pour l'exemple des pratiques de conservation des sols. Les cas de la restauration d'un maillage arboré et de la zone humide alluviale seront brièvement mentionnés.

3.2. Identification des zones d'intérêt pour le déploiement des SFN

Le schéma de construction de la note d'intérêt pour l'agriculture de conservation des sols synthétise les gammes de valeurs des critères d'intérêt pour la proportion de cultures sarclées, la réserve utile des sols et les prélèvements pour l'irrigation (*Figure 3*).

⁶ Un gain d'infiltration de 80% a été validé comme hypothèse de travail par les acteurs du territoire pour tester l'impact de la restauration d'un maillage arboré, cette valeur permettant de traduire un effet significatif des haies sur l'infiltration, bien qu'il ne soit pas démontré dans la littérature.

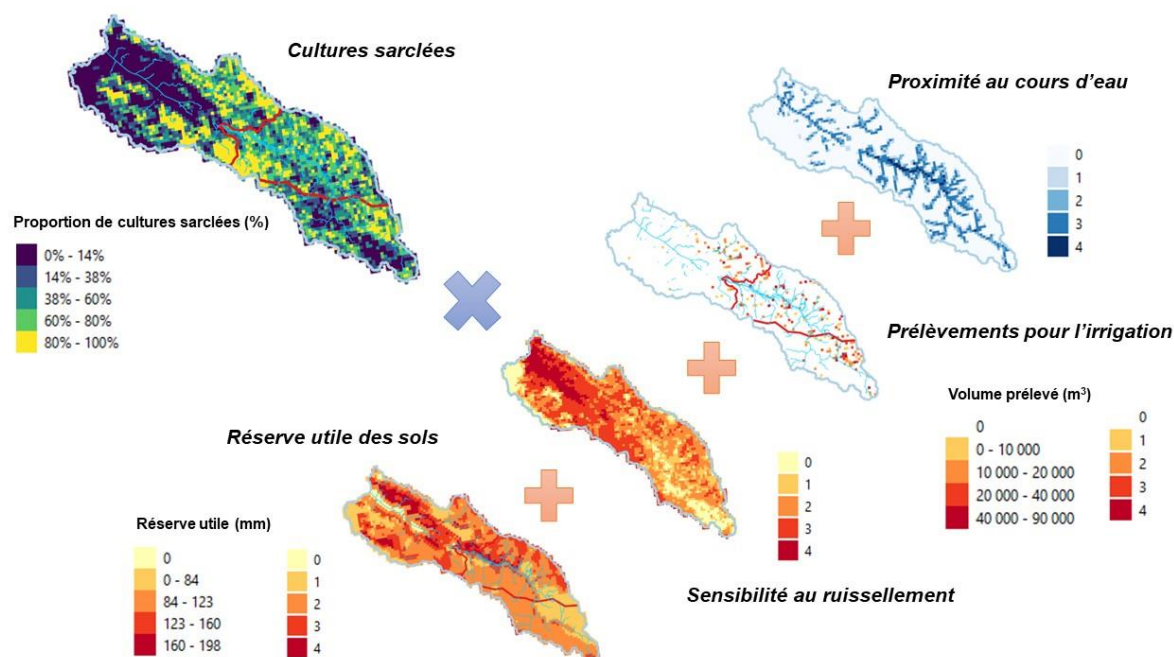


Figure 3 : Schéma de construction du score d'intérêt pour les pratiques de conservation des sols

Les zones d'intérêt pour les pratiques de conservation des sols sont présentées à titre d'exemple sur la carte utilisée comme support de travail pour la construction des scénarios (Figure 4).

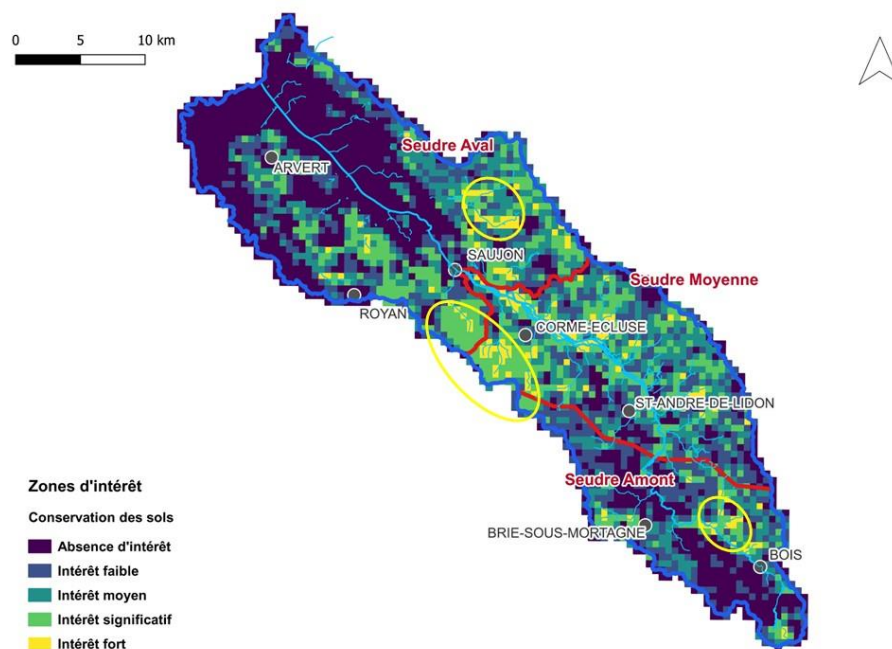


Figure 4 : Carte des zones d'intérêt pour le déploiement des pratiques de conservation des sols – les zones au plus haut niveau d'intérêt sont entourées en jaune

3.3. Scénarios de déploiement

Les classes d'intérêt présentées sont issues de la cartographie des zones de déploiement de l'agriculture de conservation des sols, avec une description de l'occupation du sol dans les secteurs concernés (*tableau III*). Le niveau de déploiement est indiqué en pourcentage de la surface en cultures sarclées, il s'agit de la proportion de surface en cultures sarclées à convertir en agriculture de conservation des sols pour chaque zone d'intérêt. Les scénarios « minimum » et « maximum » sont définis respectivement par les bornes minimale et maximale des intervalles du niveau de déploiement de l'agriculture de conservation.

Tableau III : Scénarios de déploiement des pratiques de conservation des sols selon les zones d'intérêt

Classes d'intérêt	Proportion du territoire (% surface)	Secteurs	Surface en cultures sarclées (ha)	Niveau de déploiement (% surface cultures sarclées)	Réduction de prélèvements (%)
Absence d'intérêt	35%	Boisements ; Marais estuarien	2318 ha	0%	0%
Intérêt faible	23%	Vignes ; boisements	7360 ha	[5 ; 15] %	0%
Intérêt moyen	22%	Cultures sarclées à proximité de boisements	12 019 ha	[5 ; 20] %	5%
Intérêt significatif	16%	Zone humide alluviale ; Seudre moyenne	10 080 ha	[10 ; 25] %	10%
Fort intérêt	4%	Zone humide alluviale ; Bords de cours d'eau	3003 ha	[10 ; 30] %	10%

Dans le scénario « réaliste », le développement des pratiques de conservation des sols a été fixé de 5 % pour les zones d'intérêt faible et moyen à 10 % pour les zones d'intérêt significatif à fort. Dans le scénario « exploratoire », cette proportion s'élève de 15 % dans les zones à faible intérêt à 30 % pour les zones à fort intérêt avec une incrémentation de 5% entre les niveaux d'intérêt. L'adoption de niveaux de déploiement croissants selon les classes d'intérêt témoigne de leur pertinence, partagée par les acteurs du territoire.

En résumé, le scénario maximum affiche près de 6900 hectares convertis en agriculture de conservation des sols, soit 20 % de la superficie totale en cultures sarclées, contre 2300 hectares dans le scénario minimum, soit 6 % de la superficie totale en cultures sarclées. Des réductions de prélèvements de 0 %

à 10 % associées aux pratiques de conservation des sols ont été affectées en fonction de la nature des sols des zones d'intérêt, d'après les estimations des représentants de la profession agricole.

3.4. Gains d'infiltration par zone de sol

À partir d'une hypothèse de travail d'un gain d'infiltration de 30 % pour l'adoption de pratiques de conservation des sols, le scénario « maximum » de développement de l'agriculture de conservation des sols, la distribution des gains d'infiltration par zone de sol s'étend entre 0 % et 4,74 % avec une moyenne de 2,2 % (Figure 5). À titre de comparaison, les gains d'infiltration pour le scénario « minimum » s'étendent de 0 % à 1,62 % avec une moyenne de 0,72 % à l'échelle de l'ensemble des zones de sol.

Dans le cas des haies, avec un gain d'infiltration de 80 % simulé par rapport à un sol nu, le scénario « minimum » ne permet pas d'estimer des gains d'infiltration significatifs, tandis que le scénario « maximum » affiche des gains d'infiltration allant de 0 % à 0,4 % selon les zones de sol, avec une moyenne de 0,21 %.

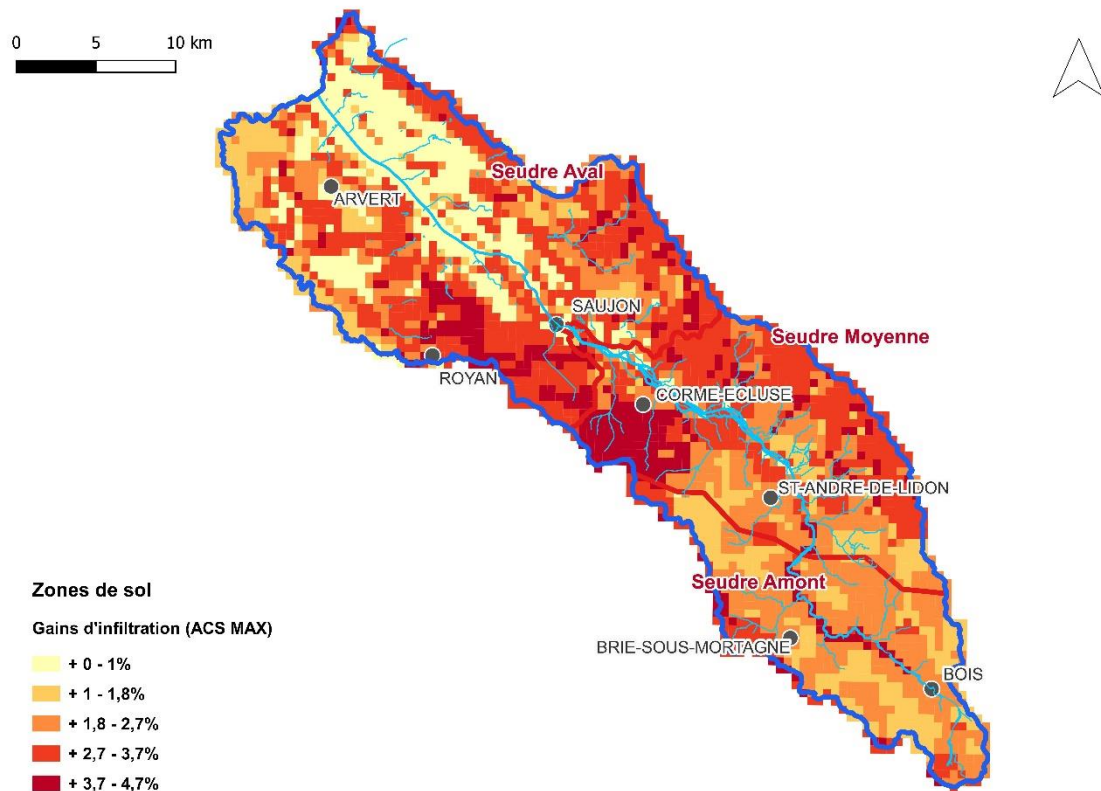


Figure 5 : Carte des gains d'infiltration estimés dans le scénario « maximum » de déploiement des pratiques de conservation des sols

Ces premiers résultats permettent d'évaluer le gain d'infiltration associé au déploiement des pratiques de conservation et de haies selon les zones de sol du bassin versant. Même si ces gains semblent relativement faibles en ordre de grandeur, ils s'appliquent sur un ensemble de zones de sol du bassin

versant représentant des surfaces importantes. Par ailleurs, ces gains d'infiltration sont à mettre en regard du cumul pluviométrique et de la dynamique de recharge des aquifères.

Au total, ces gains d'infiltration correspondent à une infiltration supplémentaire de 550 000 m³ à 1,3 millions de m³ pour les scénarios « minimum » et « maximum » de déploiement des pratiques de conservation des sols. Par ailleurs, les réductions de prélèvements estimées permettraient d'économiser environ 130 000 m³/an dans le scénario « maximum ».

3.5. Résultats des simulations des scénarios

Les gammes de gains d'infiltration et les réductions de prélèvements correspondants aux scénarios de déploiement des pratiques de conservation des sols et de restauration d'un maillage arboré ont été paramétrées dans le modèle MARTHE. Dans le cas de la restauration de la zone humide alluviale, une élévation des niveaux d'eau au niveau des ouvrages a été paramétrée.

Les simulations des scénarios de déploiement des pratiques de conservation des sols ne présentent pas de modification significative de la dynamique de recharge des aquifères au droit des piézomètres étudiés sur le bassin versant. En revanche, des gains de débit significatifs sont mis en évidence sur la Seudre sur l'ensemble de la période 2000-2018 : de l'ordre de +5 % à +7 % au début de la période d'étiage (mai-juin) à Saint-André-de-Lidon.

À titre d'exemple, les variations de débit simulées de la Seudre à Saint-André-de-Lidon lors d'une année sèche permettent d'appréhender les résultats des simulations sur le déploiement des pratiques de conservation des sols (*Figure 6*).

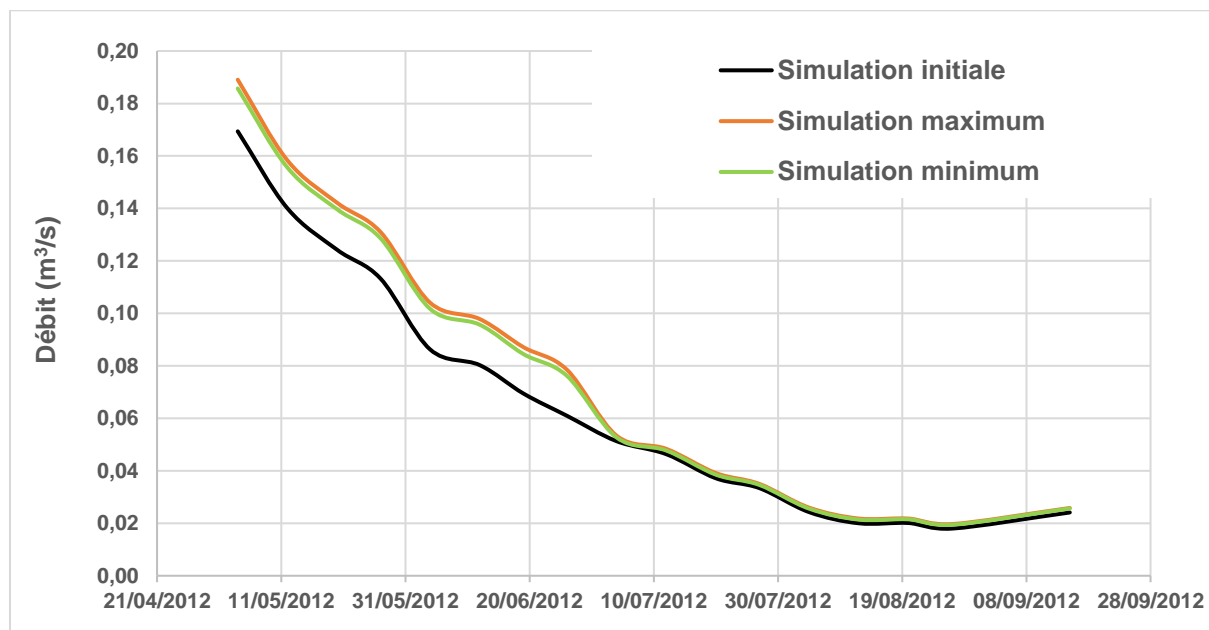


Figure 6 : Simulations de l'effet des scénarios de déploiement des pratiques de conservation des sols sur le débit d'étiage de la Seudre à Saint-André-de-Lidon en année sèche (2012)

Pour l'année 2012 présentée sur cette figure, un gain de débit est particulièrement visible au début de la période d'étiage, entre le mois de juin et la première quinzaine du mois de juillet (+15-20 %). Le

franchissement du débit objectif d'étiage (100 L/s)⁷ est retardé d'environ 15 jours du fait de l'augmentation dudit débit. En revanche, les courbes de débit convergent à partir de mi-juillet et l'impact des gains d'infiltration diminue fortement jusqu'à atteindre une valeur nulle. Cela peut s'expliquer par l'absence de précipitations estivales limitant les impacts des gains d'infiltration et par la dynamique de vidange naturelle de la nappe d'accompagnement de la Seudre constituant la source principale d'écoulement à cette période. Ce comportement hydrologique particulier à la Seudre limite d'autant les effets sur le débit d'étiage des gains d'infiltration simulés en fonction du déploiement de l'agriculture de conservation.

Pour la restauration d'un maillage arboré, les gains d'infiltration simulés étaient fortement limités (<1 %) par la surface que représente ces éléments du paysage à l'échelle du bassin versant. Dans les scénarios de déploiement minimum et maximum, les résultats des simulations montrent une absence de modification de la recharge des nappes et des débits de la Seudre aux différentes stations de mesure.

La simulation exploratoire de la modification des charges hydrauliques au niveau des ouvrages de la zone humide alluviale n'a pas fourni de résultats exploitables.

4. Discussion

4.1. Leçons en matière de gestion quantitative

Un impact limité des scénarios de déploiement des pratiques de conservation des sols a été mis en évidence sur les débits de la Seudre avec une augmentation moyenne de 5 % à 7 % des débits au début de l'étiage sous l'effet des précipitations, se dissipant en l'absence de pluies estivales au profit de la vidange naturelle de la nappe.

Néanmoins, cette expérience de modélisation de l'impact hydrologique des SFN sur le bassin versant de la Seudre ne permet pas de mettre en évidence un changement significatif sur le bilan des ressources et la dynamique de la nappe avec les hypothèses retenues et les changements des paramètres testés.

La modélisation de la restauration d'un maillage arboré et des pratiques de conservation des sols a montré un recul du non-franchissement du DOE jusqu'à une quinzaine de jours et une limitation de la précocité de l'étiage, ce qui n'est pas négligeable dans un contexte de tensions sur les ressources en eau et de limitation des usages, exacerbés avec le changement climatique. Pour autant, cette modélisation ne permet pas de conclure en faveur d'un soutien d'étiage et d'une augmentation de la fréquence de non-franchissement du DOE.

Par ailleurs, les SFN procurent également de nombreux services écosystémiques qui entrent en considération dans les choix d'aménagement. Parmi ces services écosystémiques, le stockage de carbone a été quantifié selon les scénarios de déploiement des différentes SFN. Au total, le stockage de carbone associé aux scénarios « maximum » de déploiement de l'agriculture de conservation (28 635 T eq CO₂/an) et de la restauration de la zone humide alluviale (25 500 T eq CO₂/an) représente

⁷ Cette valeur de DOE, en vigueur au démarrage de la présente étude, a été révisée dans le cadre de la dernière version du SDAGE (2022-2027). Le nouveau DOE de 90l/s sera appliqué dès l'année 2023.

près de la moitié des émissions de CO₂ liées à l'agriculture au sein de la Communauté d'Agglomération de Royan Atlantique (58 115 T eq CO₂/an) à titre d'exemple. Les SFN étudiées peuvent également améliorer la qualité de l'eau en limitant les phénomènes de ruissellement et d'érosion qui sont à l'origine de transferts de polluants vers les cours d'eau. Même si les risques d'érosion sont relativement faibles sur le bassin versant de la Seudre, ces solutions peuvent présenter un fort potentiel pour des territoires plus sensibles.

Au-delà des résultats de la modélisation, la conduite d'ateliers participatifs sur les SFN témoigne du caractère mobilisateur de ce concept ayant permis de faire dialoguer des acteurs de la gestion de l'eau, de la conservation de l'environnement et des acteurs agricoles. Une première phase de définition du concept et de recueil d'idées en lien avec les SFN a permis d'intégrer les propositions des acteurs et de dépasser les représentations simplistes de ces « solutions ».

À l'issue du processus de modélisation participative, les acteurs se sont accordés sur l'intérêt de mettre en œuvre des actions et de développer les connaissances sur les milieux et leurs fonctions hydrologiques au sein du PTGE. En effet, des fiches-actions ont été adoptées pour les SFN mentionnées, à savoir la restauration de la zone humide alluviale, les pratiques de conservation des sols et la restauration d'un maillage arboré.

Pour mener ces actions de manière efficace sur le territoire, l'interdisciplinarité cultivée au cours des ateliers est identifiée comme une condition de réussite. Des enjeux forts de coordination du PTGE avec d'autres initiatives locales et des politiques publiques à plus grande échelle ont été mis en évidence tout au long des ateliers, avec une volonté de mise en réseau des acteurs. Plusieurs exemples de dispositifs ont été cités pour appuyer la mise en œuvre des SFN sur le territoire. Pour les pratiques de conservation des sols, le cadre réglementaire de la directive Nitrates et la PAC peuvent encourager la couverture des sols et la diversification, ou encore les investissements en Coopérative d'Utilisation du Matériel Agricole pour du matériel adapté aux techniques culturales simplifiées. Sur la plantation de haies, le Département de Charente-Maritime, l'Agence de l'eau Adour-Garonne et la Chambre d'Agriculture 17 portent un programme de financement de plantation de haies en milieu agricole (EVA 17). Localement, le PTGE constituerait donc un levier parmi d'autres pour accompagner les changements de pratiques et d'usages des sols en lien avec l'eau.

4.2. Enseignements méthodologiques en matière de modélisation

Les principales limites de cette démarche résident dans les incertitudes sur les gains d'infiltration théoriques associés aux pratiques de conservation des sols et à la présence de haies. En effet, les gains d'infiltration indiqués sont des valeurs moyennes qui n'ont pas été mesurées dans les conditions pédoclimatiques du bassin versant de la Seudre et selon les pratiques culturales en place. L'extrapolation des valeurs de gain d'infiltration à l'ensemble des zones de sol est donc discutable, mais difficilement quantifiable sans avoir recours à des expérimentations et des campagnes de mesures sur site.

En-dehors de ces incertitudes, l'analyse de l'impact hydrologique de ces types de SFN reste incomplète en l'absence d'estimation de l'évapotranspiration supplémentaire engendrée par la couverture des sols

et la plantation de haies. Dans le cas des couverts végétaux, l'évapotranspiration supplémentaire s'exprime essentiellement en période hivernale et au début du printemps, elle peut être minimisée en ajustant les dates de semis et de destruction des couverts [MEYER *et al.*, 2020]. Pour les haies, les impacts de l'évapotranspiration sont particulièrement importants, notamment en période de sécheresse, et doivent être pris en considération [VIAUD *et al.*, 2009 ; GHAZAVI *et al.*, 2008]. Ce type d'analyse pourrait être réalisée en utilisant des modèles de culture de type STICS couplé avec des expérimentations de terrain. En effet, le modèle MARTHE n'intègre pas ce type de processus physiques à l'échelle de la parcelle. Il s'agit d'un modèle hydrogéologique distribué à base physique, qui reste peu adapté à la modélisation de changement d'usages des sols ou de pratiques culturales.

Dans le cas de la restauration de la zone humide alluviale, les limites de la démarche concernent à la fois les incertitudes sur le fonctionnement hydrologique de la zone de marais tourbeux alluviaux, sur la réversibilité des processus de dégradation du milieu, et sur l'avenir de cette zone après la réalisation des projets de restauration de la continuité écologique. L'identification des zones d'intérêt écosystémique permet de cibler les parcelles à restaurer en priorité, selon des critères de potentiel écologique. Ces éléments peuvent appuyer une stratégie de veille foncière sur le bassin versant en lien avec le programme d'actions du PTGE. À terme, le changement climatique est également susceptible d'altérer le fonctionnement de ce milieu, dont l'évolution doit être particulièrement suivie.

De manière générale, la modélisation intervient en tant qu'aide à la décision pour les acteurs du territoire, de manière à partager des ordres de grandeur et à expérimenter l'évaluation des impacts hydrologiques. En ce sens, les limites du modèle et du paramétrage sont présentées en amont de chaque phase de manière transparente.

5. Conclusion

Au-delà des aspects liés à la modélisation, cette démarche a permis d'impliquer les acteurs du territoire dans un processus de concertation où s'ouvrent les questions de gestion de l'eau et d'adaptation au changement climatique. La modélisation ouvre également des possibles et des espaces de discussion pour les acteurs du territoire, en raisonnant sur des scénarios d'aménagement du territoire. Les multiples services rendus par les SFN permettent d'attirer l'attention vers des enjeux stratégiques pour le territoire et élargissent les possibilités d'action en mêlant la gestion intégrée des ressources en eau, la préservation de la biodiversité et l'adaptation au changement climatique.

Cette réflexion au fil des ateliers sur les SFN a permis de faire émerger un ensemble de thématiques et de projets pour le territoire, alors que ce concept restait méconnu pour les acteurs du territoire en amont de la démarche. Un groupe de travail s'est constitué autour de cette expérience de modélisation participative, dont les acquis et les questionnements pourront s'exprimer dans les autres ateliers prévus pour l'élaboration du PTGE. Par la diversité des approches qu'elle mobilise, cette étude constitue un point d'entrée pour l'intégration des SFN dans les politiques locales de gestion quantitative. En effet, les éléments de connaissance et les méthodes de cartographie peuvent être approfondis, adaptés et appliqués à d'autres territoires dans le cadre de l'élaboration de PTGE.

498 *Remerciements :*

499 Cet article présente les résultats d'un travail de stage financé dans le cadre du projet
500 [INCLUSIVE](#) (Convention n° ANR-21-SOIL-0004-02).

501

502

503

504

505

506

507

508

509

510 **BIBLIOGRAPHIE**

- 511 ABASQ L., PLATEL J. P., CABARET O. (2021) : *Actualisation 2000-2018 du modèle hydrogéologique des*
512 *aquifères du Sud-Charentes* : BRGM, 248 p.
- 513 AL SAYAH M., VERSINI P.A., SCHERTZER D. (2022) : *État des lieux des besoins de connaissance*
514 *pour la généralisation des SafN* : ENPC - HM&Co, 193 p.
- 515 AHMAD S., LIU H., GÜNTHER A., COUWENBERG J., LENNARTZ B. (2020) : « Long-term rewetting of
516 degraded peatlands restores hydrological buffer function ». *Science of The Total*
517 *Environment*, 749 (décembre), 141571.
- 518 BLANCO-CANQUI H., RUIS S. J. (2020) : « Cover crop impacts on soil physical properties: A review »
519 *Soil Science Society of America Journal*, 84(5), 1527-1576.
- 520 BONN A., REED M. S., EVANS C. D., JOOSTEN H., BAIN C., FARMER J., EMMER I., COUWENBERG J., MOXEY
521 A., ARTZ R., TANNEBERGER F., VON UNGER M., SMYTH M.A., BIRNIE D. (2014) : « Investing in
522 nature: Developing ecosystem service markets for peatland restoration » *Ecosystem Services*,
523 9, 54-65.
- 524 CASTILLO C., BLONDEL C. (2021) : *Estimation de volumes prélevables pour l'irrigation sur le bassin de*
525 *la Seudre* : BRGM, 67 p.
- 526 COHEN-SHACHAM E., JANZEN C., MAGINNIS S., WALTERS G. (2016) : *Nature-based solutions to address*
527 *global societal challenges* : IUCN, 97 p.
- 528 DOUEZ O., BICHOT F. (2012) : *Contribution à la gestion quantitative des ressources en eau à l'aide du*
529 *modèle Crétacé du Sud Charentes* : BRGM, 202 p.
- 530 GIEC. (2023) : *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report* : GIEC, 36 p.
- 531 GITTON C., KOSUTH P., BERTRAND N., DUMOULIN V., FALLON G., ALLIMANT P., JOLY J. (2022) : *Appui à*
532 *l'aboutissement de projets de territoire pour la gestion de l'eau (PTGE) - Examen de*
533 *l'élaboration de quinze PTGE ; Identification de voies de progrès* : CGEDD, CGAAER, 122 p.
- 534 GHAZAVI G., THOMAS Z., HAMON Y., MARIE J.-C., CORSON M. S., MÉROT P. (2008) : « Hedgerow impacts
535 on soil-water transfer due to rainfall interception and root-water uptake » *Hydrological*
536 *Processes*, 22(24), 577-585.
- 537 HOLDEN J., GRAYSON R., BERDENI D., BIRD S., CHAPMAN P., EDMONSON J., FIRBANK L., HELGASON T.,
538 HODSON M., HUNT S., JONES D., LAPPAGE M., MARSHALL-HARRIES E., NELSON M., PRENDERGAST-
539 MILLER M., SHAW H., WADE R., LEAKE J. (2018).: « The role of hedgerows in soil functioning
540 within agricultural landscapes » *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 273.

541 LESCUYER T. (2020) : « PTGE : à la recherche d'un consensus local » *Techniques Sciences Méthodes*,
542 12, 3-4.

543 MEROT P., GASCUEL-ODOUX C., WALTER C., ZHANG X., MOLENAT J. (1999) : « Influence du réseau de
544 haies des paysages bocagers sur le cheminement de l'eau de surface » *Revue des sciences*
545 *de l'eau / Journal of Water Science*, 12(1), 23-44.

546 MEURER K. H. E., HADDAWAY N. R., BOLINDER M. A., KÄTTERER T. (2018) : « Tillage intensity affects total
547 SOC stocks in boreo-temperate regions only in the topsoil - A systematic review using an
548 ESM approach » *Earth-Science Reviews*, 177, 613-622.

549 MEYER N., BERGEZ J.-E., CONSTANTIN J., BELLEVILLE P., JUSTES E. (2020) : « Cover crops reduce
550 drainage but not always soil water content due to interactions between rainfall distribution and
551 management » *Agricultural Water Management*, 231, 105998.

552 PARAN F. (2019) : *Projet ZHTB - Zones humides, soutien d'étéage, tête de bassin*. OIEau, Journée
553 technique MNRE, Paris, 13 février 2020.

554 PELLERIN S., BAMIERE L., SAVINI I., RECHAUCHERE O. (2021) : *Stocker du carbone dans les sols français*
555 *- Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1 000 et à quel coût ?* : Ed. Quae, 235 p.

556 THIERY D. (2014) : *Logiciel Gardénia, version 8.2. - Guide d'utilisation* : BRGM, 74 p.

557 UICN. (2016) : *Définition des Solutions Fondées sur la nature* : Congrès mondial de la nature, Hawaï,
558 1-10 septembre 2016.

559 VAN VOOREN L., REUBENS B., BROEKX S., DE FRENNE P., NELISSEN V., PARDON P., et VERHEYEN K.
560 (2017) : « Ecosystem Service Delivery of Agri-Environment Measures: A Synthesis for
561 Hedgerows and Grass Strips on Arable Land ». *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 244
562 (juin), 32-51.

563 VIAUD V., GRIMALDI C., MEROT P. (2009) : « Impact des haies sur la ressource en eau et en sol à partir
564 de l'exemple de la Bretagne : résultats récents et perspectives » *Revue forestière française*,
565 61(5), 493-502

566 WALLACE E. E., MCSHANE G., TYCH W., KRETZSCHMAR A., MCCANN T., CHAPPELL N. A. (2021) : « The
567 effect of hedgerow wild-margins on topsoil hydraulic properties, and overland-flow incidence,
568 magnitude and water-quality » *Hydrological Processes*, 35(3), 35:e14098.

569 WILD T. (2020) : *Nature-based solutions improving water quality & waterbody conditions: analysis of*
570 *EU funded projects* : Publications Office of the European Union, 68 p.

571