

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document à accès immédiat

Recharge maîtrisée des aquifères en France : état des lieux, retours d'expériences et perspectives

Rapport final

BRGM/RP-75655-FR
Version 1 du 8 septembre 2026

Étude réalisée dans le cadre des projets d'appui aux politiques publiques

G. Picot-Colbeaux, N. Devau

avec la contribution de Florian Leprovost, Sylvain Bart, Jérôme Barrière, Binetou Ndiaye

Ce rapport a été vérifié le **Cliquez ou appuyez ici pour entrer une date.** *et approuvé le* **Cliquez ou appuyez ici pour entrer une date.** *selon la procédure interne en vigueur au sein du BRGM, qui garantit le respect de ses engagements contractuels, de l'intégrité et de l'impartialité du contenu scientifique et technique du présent rapport, de l'éthique et de la déontologie du BRGM, ainsi que des dispositions réglementaires et législatives auquel il est soumis pour l'exercice de son activité.*

MINISTÈRE
DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE,
DE LA BIODIVERSITÉ
ET DES NÉGOCIATIONS
INTERNATIONALES
SUR LE CLIMAT ET LA NATURE
Liberté
Égalité
Fraternité

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu contractuellement.

Le demandeur assure lui-même la diffusion qu'il souhaite des exemplaires de ce tirage initial, dont il est seul propriétaire.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la règlementation en vigueur, ainsi que par les termes de la convention.

Les justificatifs du contrôle qualité de ce rapport (auteur, vérificateur, approbateur) peuvent être communiqués à titre confidentiel au destinataire du rapport, à sa demande et dans le strict respect de la réglementation applicable au traitement des données à caractères personnels.

Le BRGM ne saurait être tenu responsable de la divulgation du contenu total ou partiel de ce rapport à un tiers non-autorisé qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse **https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq** ou par ce code :

Mots clés : Hydrogéologie, Recharge maîtrisée des aquifères, Managed aquifer recharge, MAR, changement climatique, solutions d'adaptation, gestion des eaux souterraines, infiltration, épuration, filtration par berges, France

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

G. Picot-Colbeaux, N. Devau 2026. Recharge maîtrisée des aquifères en France : état des lieux, retours d'expériences et perspectives. Rapport final V1. BRGM/RP-75655-FR

© BRGM, 2026, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
M-P2-12 – 02/10/2025

Synthèse

Le changement climatique modifie profondément le cycle de l'eau en accentuant la variabilité des précipitations et augmentant la fréquence des évènements extrêmes. Ces évolutions se traduisent par une diminution de la recharge naturelle des aquifères, une intensification des sécheresses et une pression croissante sur les ressources en eau souterraine. Parallèlement, les enjeux liés à la qualité de l'eau demeurent importants, malgré les progrès observés ces dernières années dans l'atteinte du bon état écologique et chimique des masses d'eau.

Dans ce contexte, la recharge maitrisée des aquifères (ou Managed Aquifer Recharge (MAR), en anglais) apparait comme une solution d'adaptation pertinente. Cette pratique consiste à introduire de manière volontaire et maîtrisée de l'eau dans un aquifère afin d'alimenter la nappe d'eau souterraine en vue d'une utilisation ultérieure ou d'un bénéfice environnemental tout en protégeant la santé humaine et l'environnement.

La mesure 22 du Plan pour une gestion résiliente et concertée de l'eau (Plan Eau, 2023) prévoit l'élaboration d'un document de cadrage national ainsi que d'un guide méthodologique relatifs à la recharge maitrisée des aquifères. Ces documents visent à fournir aux services de l'Etat des clés de lecture afin d'accompagner l'évaluation de la pertinence, de la faisabilité et des conditions de mise en œuvre des projets de recharge maitrisée des aquifères et diversifier les mesures de gestion de l'eau actuellement mises en place dans leurs territoires.

Dans cette perspective, le présent guide méthodologique, préparé à la demande et en partenariat avec la Direction de l'Eau et de la Biodiversité (DEB) du Ministère de la Transition Ecologique, expose les principes de fonctionnement de la recharge maîtrisée des aquifères ainsi que les risques et bénéfices qui y sont associés (chapitre 2). Il propose ensuite une lecture du cadre règlementaire applicable (chapitre 3) et les principales étapes de la mise en place d'un projet de recharge maîtrisée des aquifères (chapitre 4). Plusieurs cas d'études remarquables sont ensuite présentés (chapitre 5) avant d'identifier les leviers, freins et perspectives liés à la recharge maîtrisée des aquifères en France (chapitre 6). Ce guide a pour vocation à mettre à disposition un état des connaissances, des retours d'expérience et des éléments méthodologiques permettant d'évaluer la pertinence de la recharge maitrisée des aquifères selon les contextes territoriaux et les objectifs de gestion de l'eau.

Enfin, il est important de souligner que la recharge maitrisée des aquifères ne constitue pas une solution unique. Elle doit s'intégrer dans une stratégie globale de gestion de l'eau associant sobriété des usages, réduction des pollutions et préservation des milieux aquatiques. Sa mise en œuvre doit être appréciée au regard des caractéristiques hydrogéologiques des territoires, de la disponibilité et de la qualité de la ressource, des enjeux environnementaux et des équilibres entre usages.

Sommaire

1. Introduction 9
1.1. Contexte 9
1.2. Objectifs du guide méthodologique 13

2. Comprendre la recharge maitrisée des aquifères 15
2.1. Définitions et terminologie 15
2.2. Principaux types de recharge maîtrisée des aquifères 16
2.3. Objectifs et enjeux de la recharge maîtrisée des aquifères 21
2.3.1. Objectifs des systèmes de recharge maîtrisée des aquifères 21
2.3.2. Bénéfices 21
2.3.3. Quels sont les éléments contextuels qui déclenchent la mise en œuvre des systèmes de recharge maîtrisée des aquifères ? 24
2.3.4. Enjeux et risques 25

3. Cadre règlementaire 33
3.1. Principes et textes généraux 33
3.2. L'évaluation environnementale 36
3.3. Surveillance de la ressource en eau 40
3.4. Dispositions issues du Code de la santé publique 44
3.5. Recommandations de l'ANSES 45

4. Mise en place d'un projet de recharge maîtrisée des aquifères et adaptation 49
4.1. Les principales Étapes 50
4.2. Etudes liées à la préfaisabilité et la faisabilité 55
4.3. Etudes liées à l'évaluation environnementale réglementaire 57

5. Retours d'expérience de systèmes de recharge maîtrisée des aquifères pérennes mis en place en France 61
5.1. Croissy-sur-Seine- Le Pecq (Yvelines) 63
5.2. Flins-Aubergenville (Yvelines) 66
5.3. Agon-Coutainville (Normandie) 67
5.4. HyÈres les Palmiers (Var) - dispositif Aqua Renova 69

6. Questionnements sur les leviers, contraintes et perspectives liés à la recharge maîtrisée des aquifères 71

7. Conclusion 75

8. Références bibliographiques 77

Liste des figures

Figure 1 : Évolution journalière du nombre de départements soumis à restrictions appliquées sur a) l'eau de surface et b) l'eau souterraine entre janvier 2013 et juillet 2026 (VigiEau) 10

Figure 2 : Schémas des dispositifs principaux de recharge maîtrisée des aquifères (MAR) (Injection par puits : AS « Aquifer Storage », ASR « Aquifer Storage and Recovery », ASRT « Aquifer Storage Transfer and Recovery » ; STEP : STation d'Epuration ou STEU : Station de Traitement des Eaux Usées) (Dillon 2005) 17

Figure 3 : Deux exemples schématiques de systèmes de recharge maîtrisée des aquifères (à gauche : recharge directe par forage et récupération pour usage futur ; à droite recharge indirecte par plusieurs bassins d'infiltration alternativement mis en eau pour accentuer l'épuration par le sol et l'aquifère et récupération pour usage), d'après Australian Government (2009). 19

Figure 4 : Diagramme représentant différentes méthodes de recharge maitrisée des aquifères dans des contextes hydrogéologiques variés (Gale et al., 2002) 20

Figure 5 : Grand cycle de l'eau (Source : https://www.eaufrance.fr) 20

Figure 6 : Principaux bénéfices de la recharge maîtrisée des aquifères 24

Figure 7 : Synthèse des risques associés à la recharge maitrisée des aquifères 31

Figure 8 : Cadres réglementaires multi-échelles applicables à la recharge maitrisée des aquifères 35

Figure 9 : Démarche d'évaluation et de gestion des risques liée à la recharge maîtrisée des aquifères (ANSES 2016, modifié de Australian Government 2009). La durée indicative de chaque étape est mentionnée à titre indicatif sur la base des retours d'expérience français et internationaux. 51

Figure 10 : Liste de contrôle des conditions nécessaires à l'engagement d'un projet de recharge maîtrisée des aquifères en phase de préfaisabilité (Maréchal et al. 2019, modifié d'après Australian Government (2009) 52

Figure 11 : Exemples de sites de recharge maîtrisée des aquifères (MAR) inventoriés en France (Wuilleumier et al, 2008 ; Casanova et al., 2013 ; Caballero et al., 2018) 62

Figure 12 : Schéma de la nappe de Croissy, indiquant les bassins de réalimentation et les forages de « repompage » (SUEZ ©). 65

Figure 13 : Schémas de l'installation de réalimentation de Croissy (débit : 136 800 m3/j) et de l'affinage des eaux de la nappe (usine du Pecq- débit :146 400 m3/j) (SUEZ ©) 65

Figure 14 : Fonctionnement hydrodynamique du procédé Bi'Eau (Wuilleumier et al., 2008) 67

Figure 15 : Présentation du site SAT de Agon-Coutainville (Picot-Colbeaux et al., 2021) 68

Figure 16 : Schéma de la nappe du bas Gapeau avant et après la mise en place du dispositif de recharge maitrisée indirecte (Lyonnaise des Eaux, 2014) 70

Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse règlementaire et régime administratif selon les types d'eau utilisés pour recharger les aquifères 39

Tableau 2 Liste de contrôle en phase de préfaisabilité (modifié d'après Australian Government 2009) 54

Liste des annexes

Annexe 1 Eléments bibliographiques complémentaires 83

Annexe 2 Précisions réglementaires et législatives 85

Annexe 3 Des outils utiles à la mise en place et au suivi d'un site de recharge maîtrisée des aquifères 105

Annexe 4 Synthèse d'outils accessibles et partagés utiles à la préfaisabilité et au prédimensionnement 117

Annexe 5 Focus sur certains leviers, contraintes et perspectives de la recharge maîtrisée des aquifères en France 129

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

Jusqu'à présent abondante en France, l'eau douce est utilisée à des fins domestiques (eau potable) et économiques (agriculture, industrie, loisirs, refroidissement des centrales électriques, canaux, …). La gestion des ressources en eau constitue un enjeu majeur en France, dans un contexte de pressions croissantes liées à l'évolution des usages, à la dégradation de certains milieux aquatiques et aux effets du changement climatique. La ressource en eau douce se trouve dans les eaux de surface (cours d'eau, lacs) et dans les nappes d'eau souterraine. Un volume moyen de près de 211 Milliards de m^3 (Mdm^3) se renouvelle année après année sur le territoire métropolitain, apporté à la fois par les précipitations et par les fleuves et rivières arrivant des territoires voisins (moyenne 1990-2021). Seule une fraction de ce volume est prélevable pour les usages humains, une part importante devant être laissée pour la vie des écosystèmes naturels, en particulier aquatiques. Entre 1990 et 2018, la ressource en eau douce renouvelable a diminué de 14 % en France métropolitaine (SDES, 2022). Ces phénomènes se traduisent par une baisse récurrente des débits des cours d'eau, des niveaux de nappes souterraines parfois durablement déficitaires et une augmentation des conflits d'usage entre les différents secteurs consommateurs d'eau (alimentation en eau potable, agriculture, industrie, milieux naturels). Au cours de la dernière décennie, la multiplication d'épisodes de sècheresse et la succession d'années déficitaires en précipitations ont accentué les tensions sur la ressource en eau, comme en témoigne l'augmentation progressive du nombre de départements soumis à des restrictions d'usage de l'eau, tant pour les eaux de surface que pour les eaux souterraines (Figure 1).

L'eau souterraine est une ressource invisible contenue dans les aquifères aux capacités de « stockage »[1] remarquables, estimée entre 0,8 et 1,9 Milliard de m^3 par Gleeson *et al*. (2015). Dans le grand cycle de l'eau, les eaux souterraines se renouvellent plus ou moins rapidement. Certains aquifères profonds contiennent des eaux provenant de pluies tombées il y a des dizaines, voire des milliers d'années. A l'inverse, les aquifères superficiels contiennent de l'eau qui transite en quelques années, les rendant particulièrement vulnérables aux pollutions et aux variations de précipitation. Sous nos latitudes, c'est lors de la période hivernale, lorsque la végétation est en dormance et qu'elle prélève moins d'eau, que les précipitations rechargent efficacement les aquifères. Cette recharge naturelle est estimée à 12 000 km^3/an à l'échelle du globe par Margat (2008).

Or, l'eau souterraine exploitable est rare et répartie de façon inégale. Près de la moitié de cette eau est saline, limitant fortement leur utilisation pour l'alimentation en eau potable et pour l'irrigation, qui constitue l'un des usages les plus consommateurs en eau. Les pressions sur la ressource sont aussi très inégales selon les zones climatiques et le degré de développement, industriel, touristique ou agricole. Les zones littorales, en particulier, sollicitent les ressources en eau souvent au-delà de leurs capacités, avec une menace accrue d'intrusion saline dans les nappes côtières. Pourtant, le bilan global semble positif : à l'échelle planétaire, l'exploitation des eaux souterraines ne représenterait que 8 % de la recharge, selon les chiffres de Margat et Van der Gun (2013). C'est donc régionalement et localement que l'équilibre entre la recharge, les prélèvements et les écoulements des eaux souterraines est extrêmement fragile.

[1] Le terme « stockage » implique ici que l'eau introduite se répartit dans la porosité de l'aquifère et se déplace suffisamment lentement entre le point d'entrée à un instant t et le point de sortie à un instant t+1 se traduisant par un stockage de l'eau dans l'aquifère et dans tous les cas à un ralentissement des eaux.

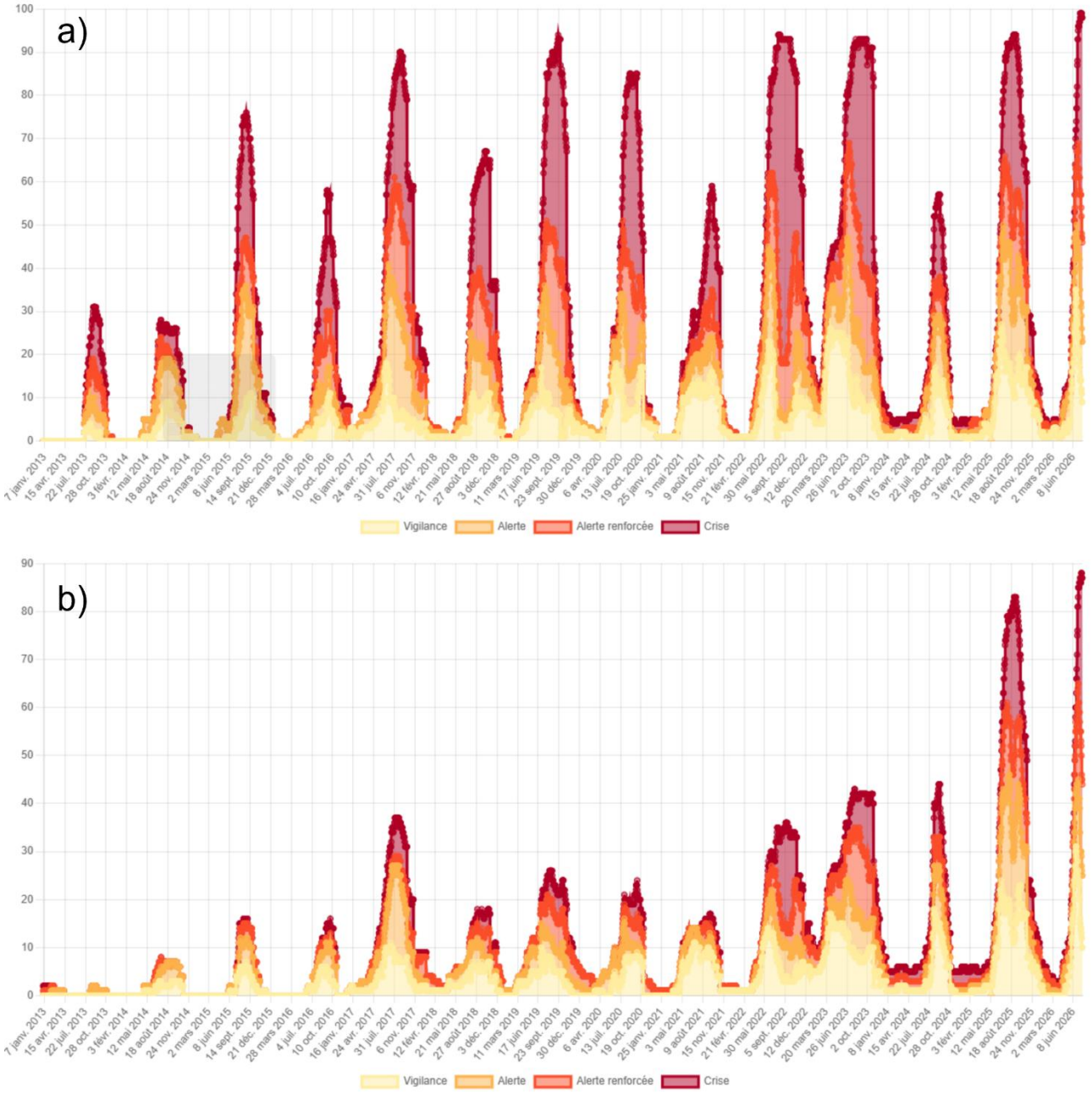


Figure 1 : Évolution journalière du nombre de départements soumis à restrictions appliquées sur a) l'eau de surface et b) l'eau souterraine entre janvier 2013 et juillet 2026 (VigiEau)

Cependant, les évolutions récentes demeurent préoccupantes. L'action humaine sur le climat perturbe le grand cycle de l'eau et entraine des variations de précipitations qui, plus rares ou plus intenses, favorisent le ruissellement par rapport à l'infiltration, limitant la recharge naturelle des aquifères. Par ailleurs les besoins en eau augmentent, tandis que la diminution des apports et l'augmentation des prélèvements signifient une baisse du niveau des nappes en France de 0,5 m

à 10 m selon les aquifères et les scénarios climatiques considérés (Projet Explore 2070[2]). L'actualisation de l'étude via les projections Explore2[3] indique que i) le changement climatique conduira à une intensification de divers événements extrêmes sur les domaines modélisés, ii) les simulations projettent une intensification des sécheresses hydrologiques et du sol (confiance forte) ainsi qu'une fréquence accrue de hauts niveaux de nappe en hiver, et iii) les modèles appliqués dans le cadre du projet Explore2 le sont dans leur forme la plus aboutie et restent néanmoins perfectibles avec de nombreux verrous scientifiques à lever pour réduire l'incertitude sur le climat et l'hydrologie.

De plus, la pollution des eaux superficielles et souterraines constitue une problématique environnementale majeure, affectant la qualité de l'eau potable, des écosystèmes aquatiques et des activités humaines. Qu'il s'agisse des eaux souterraines ou des cours d'eau, ces ressources sont menacées par diverses sources de contamination, notamment les rejets industriels, les pesticides et les produits chimiques utilisés en agriculture, ainsi que les déchets domestiques non traités. La persistance de ces polluants dans les eaux souterraines, souvent invisibles, les rend d'autant plus difficiles à identifier et à traiter. En 2022, 43,6 % (contre 41,4 % en 2010) des masses d'eau superficielle françaises affichent un bon ou très bon état écologique. 67,9 % des masses d'eau superficielle et souterraine présentent un bon état chimique (contre respectivement 51,2 % et 58,9 % en 2010) (SDES 2024).

Les solutions, dans leur grande majorité, existent déjà, dans le monde et en France, depuis de nombreuses années. Il s'agit de les mettre en œuvre, de les intégrer dans des stratégies cohérentes de gestion des nappes :

- Caractériser, suivre et prédire sur la base de modèles fiables l'évolution des ressources et besoins en eau.
- Pratiquer la sobriété en optant pour des activités moins consommatrices d'eau.
- Diminuer la pression sur la qualité de l'eau en diminuant les produits chimiques persistants et mobiles dans l'environnement.
- Améliorer davantage le traitement des eaux usées avant leur rejet dans le milieu naturel ou leur réutilisation.
- Utiliser et réutiliser des eaux non conventionnelles (eaux usées, eaux salines, pluies urbaines…) après traitement adapté.
- Retenir l'eau sur les territoires en ralentissant les écoulements et en « stockant » l'eau dans les milieux naturels.

Les prélèvements relatifs aux besoins en eau baissent depuis une vingtaine d'années, hormis ceux pour l'agriculture qui restent stables en moyenne. Des mesures réglementaires[4] visent à garantir une gestion équilibrée de la ressource en eau et à la partager lorsqu'elle se raréfie.

Dans ce contexte de raréfaction et de variabilité accrue de la ressource en eau, la recharge maitrisée des aquifères (MAR) apparait comme une des solutions particulièrement pertinentes pour renforcer la résilience des territoires face à une situation de déséquilibre. La recharge maitrisée des aquifères consiste à introduire de manière volontaire et maîtrisée de l'eau dans un aquifère afin d'alimenter la nappe d'eau souterraine en vue d'une utilisation ultérieure ou d'un bénéfice environnemental tout en protégeant la santé humaine et l'environnement. En s'appuyant

[2] https://www.brgm.fr/fr/reference-projet-acheve/explore-2070-relever-defi-changement-climatique
[3] https://ofb.gouv.fr/explore2-des-futurs-de-eau & https://www.drias-climat.fr/
[4] Décret n° 2021-795 du 23 juin 2021 relatif à la gestion quantitative de la ressource en eau et à la gestion des situations de crise liées à la sécheresse, et Décret n° 2022-1078 du 29 juillet 2022 relatif à la gestion quantitative de la ressource en dehors de la période de basses eaux

sur les capacités naturelles de « stockage » du sous-sol, la recharge maitrisée des aquifères permet, entre autres, de restaurer ou maintenir le bon état quantitatif ou qualitatif d'une masse d'eau et de contribuer au maintien des débits d'étiage et des milieux associés. A ce titre, elle s'inscrit pleinement dans les mesures prises pour le retour au bon état des masses d'eau mais également dans les stratégies d'adaptation au changement climatique.

La recharge maitrisée des aquifères s'est beaucoup développée par le passé en France à la suite des d'épisodes de sécheresse sévères et dans de nombreux pays faisant face à un stress hydrique fréquent (Australie, Mexique, Israël, Afrique du Sud, USA, Inde). Le portail « MAR-Portal » (IGRAC ; Stefan *et al.* (2018)) contient des informations détaillées sur les sites de recharge maîtrisée des aquifères à travers le monde. Environ 1 200 études de cas provenant de plus de 50 pays et issues de sources de données ouvertes ont été compilées et analysées. En France, riche d'une cinquantaine de sites recensés encore actifs pour la plupart (Wuillemier et Seguin, 2008 ; Casanova *et al*., 2012 ; Caballero *et al*., 2014), la recharge maitrisée des aquifères est de plus en plus utilisée et les orientations récentes des politiques publiques de l'eau confirment l'intérêt de mobiliser ce type de solutions. De façon générale, les systèmes de recharge maîtrisée des aquifères se sont imposés face à d'autres alternatives (traitement directe des eaux en usine, importation de ressources plus lointaines) grâce à leurs typologies variées s'adaptant à chaque situation spécifique, à leurs souplesses d'utilisation et à leurs coûts modérés.

Les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion de Eaux (SDAGE), qui définissent les orientations stratégiques á l'échelle des grands bassins, encouragent une gestion équilibrée et durable de la ressource, intégrant des actions visant à améliorer la recharge des nappes et à sécuriser la ressource. Selon les SDAGE, les informations vis-à-vis de la recharge maîtrisée des aquifères reprises dans les documents sont variables, allant du rappel du cadre réglementaire (Bassin Loire-Bretagne[5]) à des recommandations techniques (Bassin Rhône Méditerranée Corse[6]) en passant par des points dédiés pour préparer le territoire à assurer la résilience et la gestion équilibrée face au changement climatique (Bassin de la Seine et des cours d'eau côtiers normands[7], Bassin Artois Picardie[8]). Les réflexions conduites dans le cadre des Assises de l'eau (2018-2019) et du Varenne agricole de l'eau (2022) et de l'adaptation au changement climatique ont souligné la nécessité de développer une stratégie d'accès à l'eau pour l'agriculture reposant sur un ensemble de leviers complémentaires : amélioration de l'efficience des usages, transition agroécologique, optimisation des ressources existantes et développement de solutions innovantes de gestion de l'eau. Dans le cadre des SDAGE, les Projets de Territoire pour la Gestion de l'Eau (PTGE) peuvent constituer un dispositif adapté pour évaluer la pertinence et les conditions de mise en œuvre de la recharge maîtrisée des aquifères à l'échelle locale, dans une logique de concertation et de planification. Dans les secteurs en déséquilibre quantitatif ou équilibre précaire identifiés par le SDAGE, cette solution est envisagée dans l'objectif de gestion équilibrée de la ressource en complément des actions d'économie d'eau et de rationalisation des usages (Comité de bassin Rhône Méditerranée, 2022). L'objectif fixé à l'issue des Assises de l'eau est la mise en œuvre d'au moins 100 PTGE à l'horizon 2027.

Dans la continuité de ces orientations stratégiques et des réflexions menées ces dernières années, le plan d'action pour une gestion résiliente et concertée de l'eau (Plan Eau) a été lancé par le Président de la République le 30 mars 2023. Il fait suite de la sécheresse sévère de 2022 durant laquelle la quasi-totalité des départements a connu des restrictions des usages de l'eau,

[5] https://sdage-sage.eau-loire-bretagne.fr/files/live/mounts/midas/Donnees-et-documents/Programme%20de%20mesures%20Loi (pages 104 et 112)
[6] https://www.documentation.eauetbiodiversite.fr/fr/notice/file/94272
[7] https://www.calameo.com/agence-de-l-eau-seine-normandie/read/004001913e70f7f2c707c
[8] https://www.eau-artois-picardie.fr/sites/default/files/livret_3_orientations.pdf

et des territoires en crise ont connu des tensions ou des ruptures d'approvisionnement en eau potable. Elaboré en concertation avec les acteurs de locaux, le Comité national de l'eau (CNE) et les comités de bassin, le Plan Eau a pour objectif de préserver la ressource en eau en agissant pour plus de sobriété (dont la réduction de 10% des prélèvements d'ici à 2030), pour accroître la disponibilité de la ressource et pour préserver la qualité de l'eau. La 22ème mesure du Plan Eau porte sur la recharge maîtrisée des aquifères.

Toutefois, la recharge maitrisée des aquifères ne constitue pas une solution unique et doit s'inscrire dans une stratégie territoriale globale associant l'ensemble des acteurs concernés. Sa mise en œuvre doit être appréciée au regard des caractéristiques hydrogéologiques des territoires, de la disponibilité et de la qualité de la ressource, des enjeux environnementaux et des équilibres entre usages. Elle s'inscrit dans une approche globale de gestion de l'eau planifiée sur un temps long, en complément des actions de sobriété, d'amélioration de l'efficience des usages et de préservation des milieux aquatiques.

1.2. OBJECTIFS DU GUIDE METHODOLOGIQUE

Ce guide méthodologique s'inscrit dans la mise en œuvre du Plan Eau présenté par le gouvernement en 2023 afin de renforcer la résilience des territoires face aux tensions croissantes de la ressource en eau. Parmi les mesures de ce plan figure la **Mesure 22**, qui répond à l'objectif de « Remobiliser les ressources existantes et répondre au besoin de développer l'hydraulique agricole, dans le respect de la règlementation » (Ministère de la Transition écologique, 2023). Cette mesure prévoit l'élaboration d'un document de cadrage national et d'un guide méthodologique relatifs à la mise en place de systèmes de recharge maitrisé des aquifères.

Un aquifère est une roche poreuse souterraine consolidée ou non (calcaire, craie, grès, gravier, sable, …) contenant de l'eau qui y circule, d'où l'on peut extraire de l'eau souterraine (nappe d'eau souterraine). Dans le cadre de la recharge maîtrisée des aquifères, une source d'eau, telle que de l'eau naturelle (provenant par exemple de pluie ruisselante, d'un lac ou d'une rivière) ou de l'eau usée traitée (provenant par exemple des eaux pluviales ou d'assainissement urbaines), est utilisée pour « recharger » un aquifère en eau dans des conditions contrôlées. La recharge maîtrisée des aquifères consiste ainsi à réinjecter de l'eau dans les aquifères de manière ciblée en vue d'une récupération ultérieure ou pour des avantages environnementaux. Il ne s'agit pas d'une méthode d'élimination des déchets.

Dans cette perspective, le présent rapport vise à apporter aux services de l'Etat et notamment à la Direction de l'Eau et de la Biodiversité (DEB) du Ministère de la Transition Ecologique, une synthèse des connaissances disponibles sur la Recharge Maitrisée des Aquifères (MAR), les principes de fonctionnements et les conditions de mises en œuvre ainsi que les risques et bénéfices qui y sont associés. Cette synthèse s'appuie sur plusieurs documents régionaux, nationaux, européens et internationaux listés en Annexe 1. Néanmoins, d'autres ressources bibliographiques s'y référant dont certains détails non repris ici, s'avèreraient utiles et nécessaires tant les pratiques sont diverses et site spécifique.

Le guide propose une lecture du cadre règlementaire actuel ainsi qu'un retour d'expérience sur plusieurs projets mis en œuvre en France. Enfin, le rapport identifie les principaux leviers, contraintes et perspectives de développement de la recharge maîtrisée des aquifères dans un contexte de gestion durable de la ressource en eau. Ce guide a vocation à mettre à disposition un état des connaissances, des retours d'expérience et des éléments méthodologiques permettant d'apprécier la pertinence de la recharge maitrisée des aquifères selon les contextes territoriaux et les objectifs de gestion de l'eau.

Ce présent rapport n'a pas vocation à constituer un guide opérationnel de mise en œuvre des systèmes de recharge maitrisée des aquifères. Il propose, en complément des éléments de cadrage national (Ministère de la Transition Ecologique, de la Biodiversité et des Négociations Internationales sur le Climat et la Nature, 2026), des clés de lecture permettant d'appréhender la diversité des approches de recharge maitrisée des aquifères, leurs bénéfices potentiels ainsi que les risques et limites qui peuvent leur être associés. Les éléments présentés ont pour objectif d'éclairer la réflexion des acteurs sans viser l'exhaustivité et s'adressent plus particulièrement aux services de l'Etat et ses établissements publics investis dans la gestion quantitative et qualitative de la ressource en eau, et la préservation de la biodiversité.

2. Comprendre la recharge maitrisée des aquifères

2.1. DEFINITIONS ET TERMINOLOGIE

La Recharge Maîtrisée des Aquifères (MAR) consiste à introduire de manière **volontaire** et **maîtrisée** de l'eau dans un aquifère afin d'alimenter la nappe d'eau souterraine en vue d'une utilisation ultérieure ou d'un bénéfice environnemental tout en protégeant la santé humaine et l'environnement (Australian Guidelines for MAR, 2009). Plus récemment, Dillon *et al.* (2019) évoque la recharge maîtrisée des aquifères comme une stratégie de **gestion de l'eau**, en parallèle de la gestion de la demande en eau, **pour maintenir, améliorer et sécuriser les systèmes hydrogéologiques sous stress hydrique et pour protéger et améliorer la qualité de l'eau**. La recharge maîtrisée des aquifères comme outil de gestion des ressources en eau met en œuvre des procédés aussi variés que les objectifs qu'elle se propose d'atteindre (Margat, 1972) et englobe dès lors une **grande variété de systèmes** de recharge maîtrisée des aquifères : de sources d'eau utilisées pour recharger l'aquifère, de méthodes de recharge et de pratique de gestion des flux d'eau (Dillon *et al.*, 2022).

Le terme anglais « Managed Aquifer Recharge » (MAR) est l'équivalent de la recharge maitrisée des aquifères, et il remplace progressivement le terme de « recharge artificielle » qui est encore souvent utilisé, bien qu'il diffère de la recharge maîtrisée des aquifères. En effet, la recharge artificielle n'implique pas nécessairement un processus de gestion (Dillon *et al.*, 2022), laisse entendre à tort que cette eau n'est pas naturelle, et n'inclut pas dans la terminologie l'ensemble des systèmes couverts par la nouvelle terminologie MAR. Le terme Recharge Maîtrisée des Aquifères (MAR) est utilisé dans la suite du document.

Dans la notion de recharge maitrisée des aquifères, le qualificatif « maitrisée » fait surtout référence à la maîtrise des risques qui est associée aux pratiques de recharge maîtrisée des aquifères dans le cadre réglementaire. La terminologie actuelle s'inscrit dans une évolution importante du cadre règlementaire au cours des 50 dernières années, qui intègre désormais de manière renforcée la protection de l'environnement et des masses d'eau. Ainsi, la recharge maitrisée des aquifères est davantage définie par la capacité à garantir le non-impact des opérations sur les milieux aquatiques et la santé humaine que par le seul pilotage hydraulique d'introduction de l'eau dans un aquifère via le dispositif de recharge. Néanmoins, le terme de « recharge artificielle » est celui utilisé dans le cadre règlementaire français et européen (cf. Section 3) et dans de nombreuses références bibliographiques détaillant des systèmes de recharge maîtrisée des aquifères récents et anciens encore opérationnels aujourd'hui.

De plus, le caractère **intentionnel** de la recharge maitrisée des aquifères est un élément central à sa définition. Ainsi, les formes non intentionnelles de recharge des aquifères associées aux pratiques anthropiques ne sont pas considérées comme recharge maîtrisée des aquifères, c'est notamment le cas des fuites de réseaux de distribution ou d'assainissement, des excès d'irrigation, des fuites des canaux de navigation, etc. Certaines de ces pratiques apportent cependant une recharge non négligeable accompagnant parfois un déséquilibre concernant la qualité des eaux souterraines qui sont dans ces pratiques non mesurées et non suivies (Annexe 3 dans European Commission 2024- CIS Guidance document No.39).

Pour recharger les aquifères, des ressources en eau conventionnelle peuvent être utilisées telles que les eaux superficielles (de rivière, de lac, de canaux), eaux de crues, eaux de pluie, mais également des ressources en eau non conventionnelle (eaux usées, saumâtres, salines, eaux

urbaines, eaux industrielles). Ces dernières sont disponibles toute l'année et peuvent constituer un apport de base indépendant des variations de précipitation. Les ressources en eau utilisées pour recharger les aquifères sont, selon leur qualité, épurées préalablement. Dépendant de l'usage de l'aquifère rechargé, la réglementation en vigueur et la qualité de la ressource en eau, ce prétraitement peut être poussé jusqu'à atteindre une qualité d'eau potable.

Les eaux utilisées pour la recharge maîtrisée des aquifères s'appliquent aux aquifères libres ou captifs dans des contextes géologiques et hydrogéologiques divers. Les eaux ainsi utilisées et transitant dans l'aquifère via le dispositif de recharge maîtrisée des aquifères peuvent être récupérées par le biais de forage ou via l'écoulement naturel de la nappe vers des cours d'eau de surface ou des sources, par exemple. Les eaux utilisées pour la recharge maîtrisée des aquifères peuvent rehausser les niveaux d'eau souterraine (piézométrie) et améliorer la qualité des eaux souterraines initialement présentes dans l'aquifère. Les eaux issues de la recharge maîtrisée des aquifères (eau au point d'usage) peuvent être utilisées, entre autres, pour l'eau potable, l'irrigation, les procédés industriels ou à des fins environnementales.

La recharge maîtrisée des aquifères présente également des avantages sociaux et économiques tels que la sécurisation de l'approvisionnement en eau, la réduction des risques d'inondation, l'amélioration des équipements urbains et l'augmentation de la valeur foncière. Dans certains cas, la qualité des eaux souterraines initialement présentes est améliorée et les écosystèmes aquatiques mieux protégés en aval. Pour déterminer la viabilité des projets de recharge maîtrisée des aquifères, il convient de prendre en compte des facteurs autres que les coûts d'approvisionnement en eau qui s'inscrivent dans le cadre d'une évaluation selon une approche qui tient compte des aspects sociaux, économiques et environnementaux.

La recharge artificielle d'un aquifère ne doit pas être envisagée comme le seul moyen de garantir la durabilité d'une ressource ni d'atteindre le « bon état » au sens de la Directive Cadre sur l'Eau, en particulier en cas de déséquilibre marqué. Elle doit être envisagée comme une mesure complémentaire, intégrée à un ensemble d'actions de gestion des eaux souterraines. Ces actions incluent notamment une exploitation raisonnée et optimisée par pompage, ainsi que des mesures de gestion de la demande, telles que l'amélioration des rendements des réseaux de distribution et des économies d'eau. Ainsi, la recharge artificielle d'aquifère s'inscrit dans une approche globale combinant plusieurs leviers d'intervention.

2.2. PRINCIPAUX TYPES DE RECHARGE MAITRISEE DES AQUIFERES

Il existe plusieurs techniques de recharge maîtrisée des aquifères (Figure 2). On distingue parmi les différentes techniques de recharge maîtrisée des aquifères deux grandes catégories : celles qui font appel à une injection directe dans la nappe d'eau souterraine d'un aquifère, dit recharge directe, et celles qui opèrent une infiltration dans un aquifère via la zone non saturée avant d'atteindre la nappe d'eau souterraine de ce même aquifère (zone saturée de l'aquifère), dit recharge indirecte. Cette distinction aide à appréhender le cadre réglementaire qui distingue ces deux cas (cf. chapitre 3).

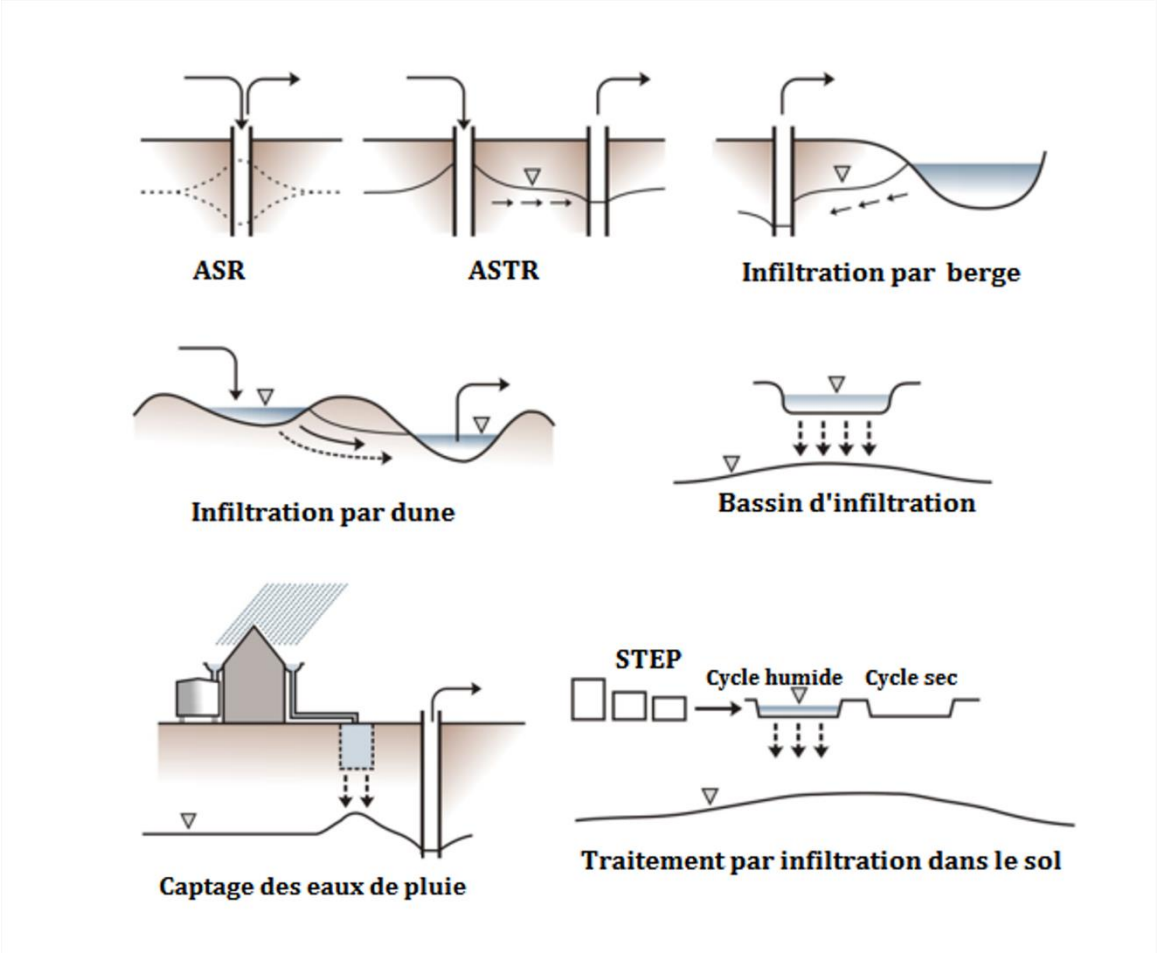


Figure 2 : Schémas des dispositifs principaux de recharge maîtrisée des aquifères (MAR) (Injection par puits : AS « Aquifer Storage », ASR « Aquifer Storage and Recovery », ASRT « Aquifer Storage Transfer and Recovery » ; STEP : STation d'Epuration ou STEU : Station de Traitement des Eaux Usées) (Dillon 2005)

Les techniques de **recharge maîtrisée d'aquifère indirecte** consistent à faire infiltrer un volume d'eau depuis la surface du sol (du bassin d'infiltration) jusqu'à la nappe, par percolation naturelle à travers la zone non saturée. Elles présentent l'avantage de permettre une filtration et une épuration de l'eau lors de son infiltration en plus du « stockage » éventuel qui s'effectue dans la porosité de la zone non saturée de l'aquifère. Le pouvoir épurateur de cette méthode (lié aux conditions oxydantes du sol traversées par l'eau) la rend particulièrement intéressante pour l'infiltration d'eaux de moindre qualité lorsqu'un traitement complémentaire est recherché (de nombreux sites d'infiltration d'eaux usées traitées dans le monde utilisent cette technique). Cette technique est également utilisée pour reminéraliser et « stocker » les eaux traitées (degré de purification élevé) via l'aquifère avant d'être prélevées. Selon la qualité de l'eau utilisée pour ces systèmes de recharge maîtrisée des aquifères, le maintien de l'efficacité du dispositif d'infiltration, c'est-à-dire la gestion du colmatage, nécessite un entretien régulier du fond des bassins au fil du temps qui sont facilement accessibles. Parmi les différentes techniques de recharge indirecte, les bassins, tranchées, noues et puits d'infiltration sont les plus couramment employées.

La **recharge maîtrisée d'aquifère directe** par injection consiste à introduire de l'eau directement dans la nappe à l'aide d'un forage. Cette méthode est principalement utilisée pour les nappes captives ou semi-captives sous recouvrement de terrains peu perméables (l'injection se fait alors sous pression), mais elle peut également être adaptée aux nappes libres profondes ou aux

situations où la surface disponible au sol est insuffisante pour recourir à une recharge indirecte. Au-delà de l'élévation piézométrique induite par cette technique, c'est aussi la création de barrière hydraulique ou de bulle d'eau douce qui est recherchée lorsque les eaux souterraines sont de mauvaises qualité, saumâtres voire saline. Dans les conditions d'injection optimale, l'eau douce injectée, moins dense que l'eau souterraine salée ne se mélange pas, créant dans l'aquifère une nouvelle ressource en eau exploitable. La qualité de l'eau de source est un facteur clé dans le choix de cette méthode. En général, si la turbidité ou la concentration en nutriments de l'eau utilisée pour la recharge est élevée ou variable, les méthodes d'injection par puits sont susceptibles d'entraîner un colmatage rapide, dont la réparation est limitée. Par ailleurs un système de lavage à contre-courant des puits est à prévoir pour les purger des sédiments et de la biomasse, ou un système d'évacuation ou de recyclage des sous-produits du traitement de l'eau.

Au-delà des techniques dites indirectes ou directes, se distingue la technique de **recharge maîtrisée d'aquifère par filtration par berges** (Riverbank filtration). Le dispositif de filtration par berge est surtout pratiqué dans les aquifères alluviaux. Elle repose sur l'exploitation d'un ou plusieurs forages situés à proximité d'un cours d'eau. Le pompage créé une dépression dans la nappe, favorisant ainsi le transfert d'eau depuis le cours d'eau à travers son lit, ses berges puis l'aquifère vers le forage, tout en bénéficiant d'une filtration et d'une dilution lors de son écoulement. Une grande partie des forages exploitent les nappes d'eau souterraine alluviales dans cette configuration de filtration par berges sans forcément la nommer ainsi, parfois par manque de connaissance (en 1997, 50% des volumes exploités pour l'eau potable en France). Une gestion de ces forages en connaissance de cause limite l'introduction de polluants dans les eaux souterraines, améliore la qualité de l'eau captée et la durabilité des forages (étape de prétraitement d'eau de cours d'eau par filtration naturelle faisant intervenir les processus de mélange, sorption et dégradation dont le maintien des conditions hydrauliques et chimiques du lit de la rivière biologiquement actif, des temps de résidence et du taux de mélange dans l'aquifère sont les facteurs déterminants).

La plupart des systèmes de recharge maîtrisée des aquifères incluent plusieurs parties (Figure 3 présentant deux cas particuliers) :

1) La collecte des eaux utilisées pour la recharge maîtrisée des aquifères (prise d'eau dans la rivière, surface ruisselante, rejet de station d'épuration, etc.).
2) Le pré-traitement des eaux utilisées pour la recharge maîtrisée des aquifères par technique d'ingénierie ou non (en adéquation avec la qualité de l'eau collectée, le dispositif de recharge de l'aquifère et la qualité de l'eau souterraine rechargée).
3) La technique de recharge de l'aquifère (bassins d'infiltration, tranchées, forages, filtrats de berges, puits, etc.).
4) L'aquifère dans lequel les eaux utilisées pour la recharge maîtrisée des aquifères s'écoulent (processus d'écoulement, de transport, de réactivité et de dilution des eaux utilisées pour la recharge maîtrisée des aquifères avec les eaux souterraines initialement présentes).
5) Le captage des eaux issues du système de recharge maîtrisée des aquifères (forages, puits, sources, etc.) ou l'écoulement intentionnel dans un écosystème dépendant des eaux souterraines (sources, débordement de nappe, espace côtier, …).
6) Le post-traitement des eaux issues du système de recharge maîtrisée des aquifères par technique d'ingénierie ou non (en adéquation avec les usages).
7) La distribution à l'utilisateur final.
8) Les points de mesure et le suivi des eaux transitant dans les différentes parties du système de recharge maîtrisée des aquifères (fonction des usages et des écosystèmes associés et devant être en adéquation avec la réglementation et l'étude d'impact environnemental).

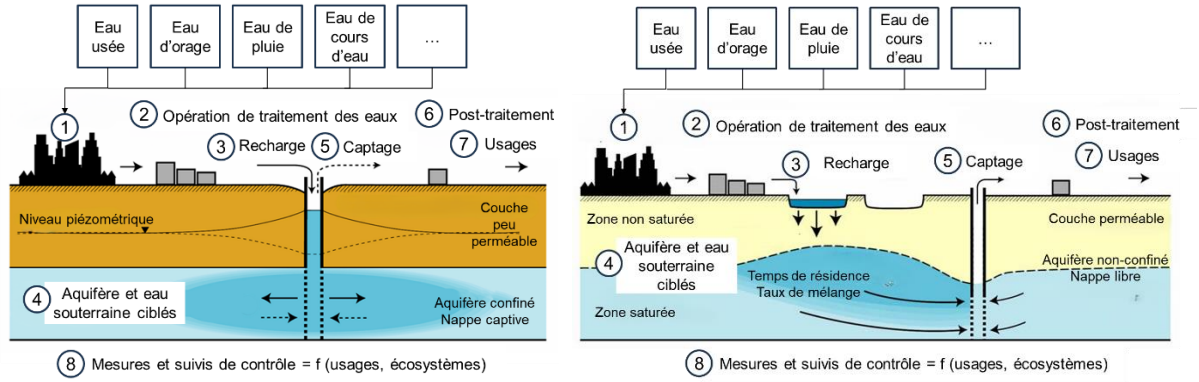


Figure 3 : Deux exemples schématiques de systèmes de recharge maîtrisée des aquifères (à gauche : recharge directe par forage et récupération pour usage futur ; à droite recharge indirecte par plusieurs bassins d'infiltration alternativement mis en eau pour accentuer l'épuration par le sol et l'aquifère et récupération pour usage), d'après Australian Government (2009).

Le choix du système de recharge maîtrisée des aquifères dépend de l'objectif pour lequel il est mis en œuvre et il est étroitement guidé par les caractéristiques du territoire et particulièrement par les caractéristiques de l'aquifère et des eaux souterraines locales ainsi que celles des eaux utilisées pour la recharge maîtrisée des aquifères (Figure 4). En principe tous les types d'eau peuvent être utilisés pour la recharge maîtrisée des aquifères. Dans les cas les plus simples, le nombre de parties composant le système de recharge maîtrisée des aquifères est réduit aux points 1), 3), 4), 5) et 8) indiqués dans la figure 3.

Les systèmes de recharge maîtrisée des aquifères sont inclus dans leur hydrosystème et font donc partie intégrante du grand cycle de l'eau (Figure 5) spécifique à chaque secteur d'étude. De plus, les systèmes de recharge maîtrisée des aquifères viennent toujours en complément des mesures en faveur des réductions des prélèvements et des limitations des émissions polluantes qui sont spécifiques à chaque territoire.

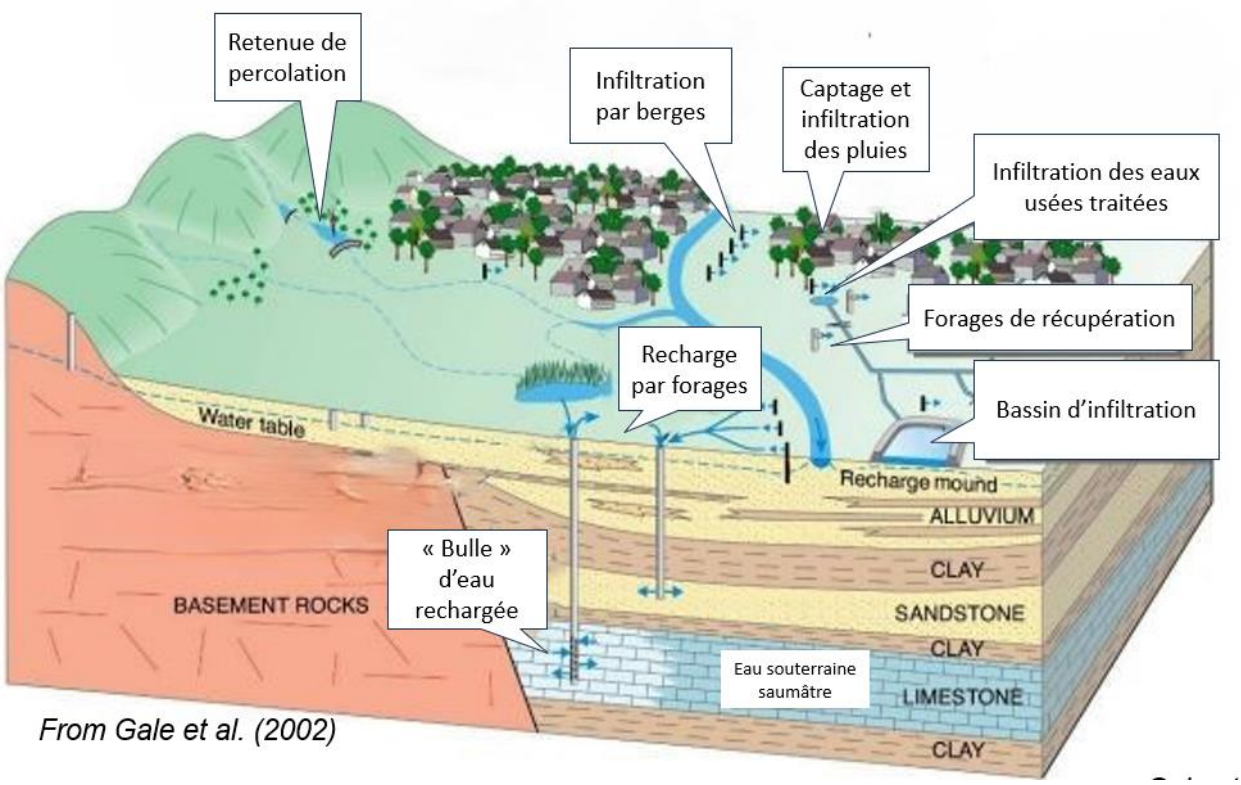


Figure 4 : Diagramme représentant différentes méthodes de recharge maitrisée des aquifères dans des contextes hydrogéologiques variés (Gale et al., 2002)



Figure 5 : Grand cycle de l'eau (Source : https://www.eaufrance.fr)

2.3. OBJECTIFS ET ENJEUX DE LA RECHARGE MAITRISEE DES AQUIFERES

2.3.1. Objectifs des systèmes de recharge maîtrisée des aquifères

Le terme de recharge maîtrisée des aquifères englobe des méthodes visant à maintenir, améliorer et protéger les eaux souterraines sous pression quantitative et qualitative. Ces techniques permettent de freiner ou de repousser une intrusion d'eau salée ou d'utiliser la capacité épuratrice du sol, des berges des cours d'eau et de l'aquifère lui-même pour une épuration naturelle de l'eau. Par ailleurs, les « bulles d'eau douce » dans les aquifères salins ou saumâtres permettent d'utiliser des eaux souterraines autrement inexploitables. Les pratiques de recharge maîtrisée des aquifères participent au rééquilibre des nappes surexploitées mais aussi maintien des zones humides, notamment en assurant un débit de base « réservé » qui répond aux exigences spécifiques des écosystèmes aquatiques. En anticipant les variations de disponibilité de l'eau liées au climat, la recharge maîtrisée des aquifères peut être une solution flexible pour sécuriser les ressources en eau à long terme, en s'appuyant sur des infrastructures naturelles ou artificielles.

2.3.2. Bénéfices

Chaque système de recharge maîtrisée des aquifères est un cas particulier qui répond à un objectif défini et qui s'intègre dans un contexte spécifique (géographique, géologique, climatique, etc.). La recharge maîtrisée des aquifères est un outil pluridisciplinaire qui combine des enjeux techniques, environnementaux et socio-économiques pour une gestion intégrée et durable de l'eau souterraine.

La recharge maîtrisée des aquifères est complémentaire aux Mesures Naturelles de Rétention d'Eau (MNRE ou NWRM Natural Water Retention Measures) et aux Solutions Fondées sur la Nature (SFN ou NBS Nature Based Solution) qui apportent également des bénéfices à plusieurs niveaux : restauration des capacités naturelles d'infiltration et de stockage, prévention des inondations et des sécheresses, amélioration de la qualité de l'eau bénéficiant aux usages humains et aux écosystèmes, préservation de la biodiversité et soutien des services écosystémiques (milieu d'accueil et de reproduction faune et flore), milieu récréatif, éducatif culturel et sportif (parc, information aux citoyens), « stockage » préservant la qualité de l'eau et évitant les pertes évaporatoires, gestion intégrée de la ressource en eau, flexibilité des systèmes, amélioration de la résilience des territoires face au changement climatique, réduction des coûts de traitement des eaux et risques sanitaires, réduction des dépenses énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Certains dispositifs de recharge maîtrisée des aquifères, par leur typologie, sont classés comme MNRE et SFN.

Les bénéfices de la recharge maitrisée des aquifères sont multiples et sont synthétisés dans la Figure 6. La mise en œuvre de ces dispositifs peut répondre aux objectifs suivants :

Améliorer ou restaurer le bon état quantitatif de la ressource en eau souterraine : la recharge maîtrisée des aquifères constitue un levier pour remédier aux déséquilibres entre prélèvements et ressource en favorisant et en contrôlant l'alimentation des eaux souterraines par des eaux souvent en excès de surface, pluviales, ou issues d'autres sources. Elle favorise les flux entrants dans l'aquifère vis-à-vis de ceux ruisselants ou « évacués », la réhausse de la piézométrie et le « stockage » temporaire dans l'aquifère, mobilisables pour des usages ultérieurs ou des bénéfices environnementaux. Le terme « stockage » implique ici que l'eau introduite se répartit dans la porosité de l'aquifère et se déplace suffisamment lentement entre le point d'entrée à un instant t et le point de sortie à un instant t+1 se traduisant par un stockage de l'eau dans l'aquifère et dans tous les cas à un ralentissement des eaux.

Gérer les fluctuations de la ressource en eau dans le temps et limiter les pénuries d'eau : au-delà de la restauration quantitative, la recharge maîtrisée des aquifères s'inscrit également dans une logique de gestion des variations temporelles de la ressource et de la demande, lesquelles peuvent se manifester à différentes échelles : saisonnière, avec une recharge pendant les périodes humides et une restitution en période sèche; interannuelle, en contribuant à atténuer les effets des sècheresses, ou encore en situation d'urgence, en facilitant la mobilisation rapide des volumes préalablement stockés. La recharge maîtrisée des aquifères permet ainsi de stocker l'eau disponible en période d'excédent (par exemple, après des pluies abondantes ou lors de la fonte des neiges) pour une utilisation ultérieure, notamment en période de sécheresse ou de forte demande. Cela permet de mieux gérer l'inadéquation entre l'offre et la demande en eau, en sécurisant les ressources disponibles, assurant ainsi une ressource en eau durable pour les usages agricoles, industriels ou domestiques.

Soutenir les débits des cours d'eau et les écosystèmes aquatiques durant l'étiage : la recharge maîtrisée des aquifères peut être utilisée pour soutenir les débits des cours d'eau et des sources, voire maintenir des débits minimaux ou encore des niveaux minimaux dans les lacs et des zones humides aidant à préserver les écosystèmes associés, notamment en période de faible pluviométrie. En effet, la recharge maîtrisée des aquifères permet de remonter la piézométrie d'un aquifère et peut ainsi contribuer à augmenter le flux sortant de l'aquifère au niveau de ses exutoires naturels (rivières, lacs, zones humides, fond topographique, …).

Améliorer l'état qualitatif de la ressource en eau souterraine et limiter les effets d'une pollution : la recharge maîtrisée des aquifères peut être utilisée pour gérer ou améliorer la qualité des eaux souterraines et de surface ou faire barrière à la migration de contaminants. L'eau arrivant à la nappe d'eau souterraine devant être de qualité supérieure à cette dernière contribue à améliorer la qualité des eaux souterraines par dilution des contaminants. La recharge maîtrisée des aquifères sert également de barrière hydraulique, destinée à protéger un forage en exploitation contre des pollutions dont l'origine est prévisible. En zone côtière, la barrière hydraulique créée par l'apport d'eau infiltrée permet de contrôler l'intrusion saline. Le traitement complémentaire qu'apporte la recharge maîtrisée des aquifères aux eaux de surface ou aux eaux usées traitées amène à protéger les zones à enjeux environnemental situées à l'exutoire.

Epuration naturelle par l'aquifère et réutilisation de l'eau rechargée : la recharge maîtrisée des aquifères fait intervenir des processus naturels d'épuration (filtration, sorption, dégradation de polluants, élimination de nutriments ou d'agents pathogènes, etc.) qui mènent à améliorer la qualité des eaux qui transitent dans l'aquifère. Cela apporte un traitement complémentaire aux eaux de surface ou aux eaux usées traitées avant leur éventuelle utilisation.

L'eau infiltrée bénéficie d'une épuration supplémentaire lors de sa percolation à travers l'aquifère et particulièrement à travers la zone non saturée de l'aquifère (Kloppmann et Casanova 2010). Celle-ci joue un rôle de filtre naturel, assurant une géo-épuration qui permet, par atténuation naturelle, de réduire une partie des constituants physiques, chimiques, et microbiologiques des eaux usées traitées. Ce pouvoir épurateur du sous-sol (SAT – Soil Aquifer Treatment) est particulièrement mis à contribution lors de l'utilisation de ressources en eau non conventionnelles, telles que les eaux usées traitées, pour recharger des aquifères.

En plus de leur capacité de « stockage », les aquifères ont donc souvent un rôle d'épuration naturelle qui apporte un bénéfice certain mais présentant des risques. Les deux aspects impliquent que les eaux passent un temps suffisant dans l'aquifère. Un **suivi rigoureux de la qualité des eaux infiltrées** et une **analyse des risques associés** sont donc indispensables pour s'assurer des bénéfices apportés par les systèmes de recharge maîtrisée des aquifères. Les systèmes en question sont complexes : écoulement à travers la zone non saturée, changements des conditions chimiques dans la nappe, notamment de l'oxygénation, rôle des

micro-organismes, en place ou apportés par la recharge, comportement d'éventuels polluants, autant de points, caractéristiques de chaque site, difficiles à comprendre et surtout à anticiper. C'est particulièrement délicat lorsqu'il s'agit d'anticiper leurs performances et les risques associés nécessitant un lien étroit entre le système de production d'eau (prélèvements d'eau souterraine) et le système de rejet/infiltration des eaux issues des stations de traitement d'eau usées.

Créer de nouveau espace de « stockage »: La recharge maîtrisée des aquifères apporte dans les aquifères d'eau souterraine saumâtre voire saline inexploitée la possibilité de créer des « bulles d'eau douce » ou par dilution de réduire la concentration en sels. Dans ce cas la recharge maîtrisée des aquifères permet d'utiliser des eaux souterraines autrement inexploitables.

Modérer le risque inondation: La recharge maîtrisée des aquifères permet de capturer et d'infiltrer les eaux pluviales et eaux de ruissellement lors d'évènements pluvieux extrêmes et ainsi de contribuer à la protection contre les inondations (van der Gun, 2020; Dillon *et al.*, 2022).

Limiter la subsidence des terrains : la recharge maîtrisée des aquifères peut être utilisée pour restaurer ou empêcher une nouvelle baisse du niveau des eaux souterraines, ou pour atténuer le phénomène de subsidence (affaissement) des sols, provoqués par la surexploitation des nappes (Seidl *et al.*, 2024).

La recharge maîtrisée des aquifères constitue une **alternative intéressante aux ouvrages de stockage en surface**. En mobilisant le sous-sol comme « réservoir » naturel, la recharge maîtrisée des aquifères permet de limiter significativement les pertes par évaporation, particulièrement importantes dans le cas des stockages superficiels. Contrairement aux ouvrages de surface, il ne perturbe pas la continuité des milieux aquatiques et n'engendre pas de phénomènes tels que la sédimentation, la dégradation de la qualité et le réchauffement des eaux ou encore les risques liés à la rupture d'ouvrage. Ainsi, la recharge maîtrisée des aquifères apparait comme une solution présentant des bénéfices notables en termes d'accès à l'eau de qualité et de préservation des milieux (Bouwer, 2002). Ce mode de « stockage » se distingue par une emprise foncière réduite et par des impacts environnementaux généralement plus limités.

La recharge maîtrisée des aquifères offre un temps de séjour minimal plus long que celui en surface ou dans un système de traitement ne passant pas par l'aquifère (induit par le temps de résidence dans l'aquifère). Il participe au ralentissement et au « stockage » des écoulements par et dans le sous-sol. Ce « stockage » souterrain prolonge ainsi la durée du traitement par géo-épuration et améliore ainsi la qualité de l'eau, réduisant les risques liés à des dangers tels que les agents pathogènes. Par la mise en œuvre des mesures et du suivi liés à la réglementation, si un échantillonnage révèle une défaillance dans la qualité de l'eau utilisée pour la recharge maîtrisée des aquifères, les systèmes de recharge maîtrisée des aquifères laissent davantage de temps pour réagir et intervenir afin de protéger la santé humaine et l'environnement.

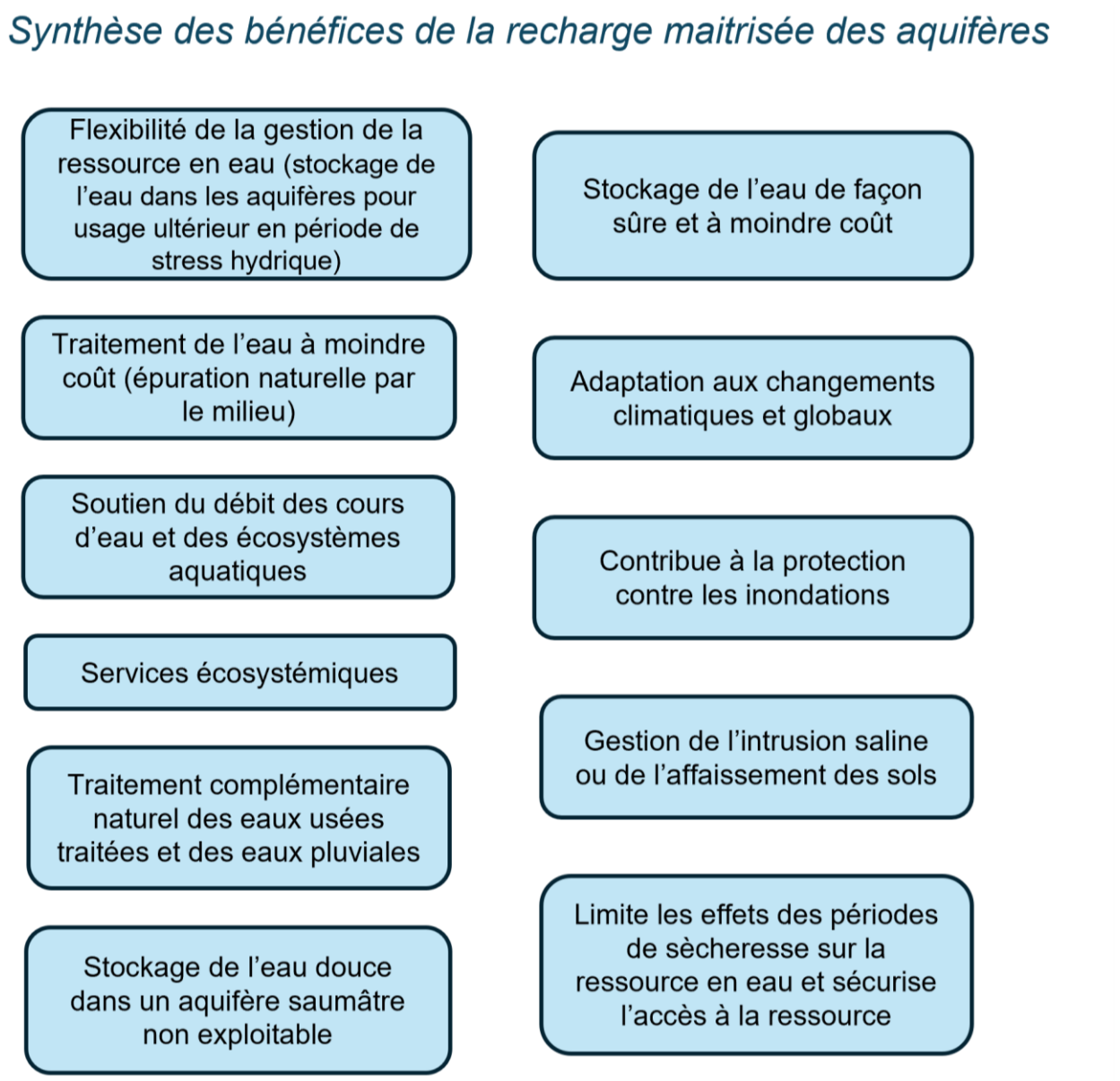


Figure 6 : Principaux bénéfices de la recharge maîtrisée des aquifères

2.3.3. Quels sont les éléments contextuels qui déclenchent la mise en œuvre des systèmes de recharge maîtrisée des aquifères ?

Les principaux éléments déclencheurs sont les situations de crises (rareté ou excès d'eau) ainsi que l'anticipation des difficultés à venir identifiables et orientées par des analyses liées au cadre réglementaire. La rareté de la ressource en eau et la nécessité de respecter les objectifs de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) imposent un diagnostic précis de l'état des masses d'eau (cf. chapitre 3). Ce diagnostic, basé sur l'état des lieux des eaux et écosystèmes aquatiques du bassin et éventuellement les analyses plus locales dites « études volumes prélevables » initie les réflexions sur les solutions à mettre en œuvre pour faire face aux problèmes de déséquilibre identifiés sur les ressources en eaux d'un territoire accentué par les impacts liés aux changements climatiques et globaux.

Les éléments contextuels déclencheurs de mise en œuvre des systèmes recharge maîtrisée des aquifères sont :

- Les diagnostics du territoire sur les eaux et écosystèmes aquatiques via l'état des lieux réglementaires, les études locales comme les études volumes prélevables, les études HMUC (Hydrologie, Milieux, Usages, Climat), etc., révélant des déséquilibres ou des risques.
- Les pressions avérées sur les milieux ou les usages.
- Le contexte climatique défavorable aggravant les tensions et les changements attendus au vu des résultats des études dédiées telles qu'Explore 70[9] et Explore 2[10], ou encore l'adoption d'une Trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (TRACC)[11].
- Les obligations légales (DCE, SDAGE) pour atteindre le bon état écologique et programmes des solutions à mettre en œuvre.

2.3.4. Enjeux et risques

Bien que la recharge maîtrisée des aquifères constitue une solution prometteuse pour la gestion durable de l'eau, elle présente un ensemble de risques qu'il est nécessaire d'évaluer avec rigueur. Ceux-ci concernent à la fois les aspects opérationnels du système recharge maîtrisée des aquifères autant quantitatifs que qualitatifs (durabilité du dispositif de recharge en lui-même, atteinte et pérennisation des objectifs) ainsi que les impacts environnementaux et socio-économiques associés à sa mise en œuvre (Figure 7). Les risques doivent être réduits voire évités et leurs coûts associés doivent être étudiés. De plus ces risques sont encadrés par un cadre règlementaire imposant des procédures d'autorisation, de mesure et de suivi, afin de garantir l'absence d'impact des dispositifs de recharge maîtrisée des aquifères sur l'environnement (cf. Chapitre 3).

La recharge maîtrisée des aquifères n'est envisageable que s'il existe un aquifère adapté, c'est-à-dire capable d'accueillir un volume d'eau suffisant à un débit de recharge suffisant pour que les avantages justifient les coûts de mise en place du projet de recharge maîtrisée des aquifères. Elle n'est également pas recommandée si le risque environnemental ne peut être ramené à un niveau suffisamment bas grâce à des mesures préventives économiquement viables (en tenant compte de l'ensemble des coûts et des avantages du projet). Et enfin, la recharge maîtrisée des aquifères nécessite une source d'eau utilisable pour la recharge maitrisée des aquifères disponible pendant une durée suffisante en adéquation avec les coûts de mise en place du projet.

Risques quantitatifs

Disponibilité de l'eau utilisée pour être rechargée : quelles que soient les eaux utilisées (de pluies, d'orages, des cours d'eau, des eaux usées traitées, …) il est indispensable de s'assurer qu'elles soient présentes en quantité suffisante pour la période de recharge ciblée en adéquation avec le projet de recharge maîtrisée des aquifères, et ce, sur le long terme. Les eaux de surface constituent la principale source mobilisée pour les opérations de recharge maîtrisée des aquifères en Europe et en France. Leur utilisation implique toutefois une évaluation quantitative fine de la ressource disponible, en raison de leur forte variabilité interannuelle et saisonnière (il en est de même pour les pluies qui selon les régions dépendent du climat). Cette variabilité peut être caractérisée à partir des chroniques de débits mensuels, permettant d'identifier les périodes de

[9] https://www.brgm.fr/fr/reference-projet-acheve/explore-2070-relever-defi-changement-climatique
[10] https://ofb.gouv.fr/explore2-des-futurs-de-eau & https://www.drias-climat.fr/
[11] https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/trajectoire-rechauffement-reference-ladaptation-changement-climatique-tracc

hautes eaux durant lesquelles des volumes excédentaires peuvent être mobilisés sans compromettre le fonctionnement hydrologique des cours d'eau. Afin de limiter l'impact du prélèvement, il est généralement privilégié en période hivernale et en période de moyenne ou hautes eaux. Dans les territoires soumis à des tensions sur la ressource, l'analyse doit intégrer la compatibilité du projet avec les autres usages et les besoins écologiques des cours d'eau, via des approches de type « volume prélevable ». Le dépassement de ces volumes constitue un facteur de risque important pour l'équilibre quantitatif des masses d'eau. Dans le cas de régimes intermittents, le risque quantitatif doit alors être évalué sur l'ensemble du cycle hydrologique, en tenant compte des impacts en aval et des interactions avec les nappes d'accompagnement. Concernant les eaux usées traitées, les flux d'eau sont plutôt continus toute l'année, même si des variations saisonnières peuvent s'observer. De même il est important d'étudier les systèmes aquatiques dépendant de ces rejets avant d'entreprendre leur utilisation dans les systèmes de recharge maîtrisée des aquifères.

Risques de débordement ou de pertes liés aux propriétés de l'aquifère : le risque quantitatif associé à la recharge maîtrisée des aquifères dépend fortement des propriétés hydrodynamiques du milieu. Ces propriétés contrôlent à la fois l'efficacité de l'infiltration, la capacité de stockage et le devenir des eaux rechargées. La porosité (coefficient d'emmagasinement), la perméabilité et l'épaisseur de l'aquifère conditionnent le volume d'eau pouvant être « stocké » et conditionnent les flux infiltrés et les temps de résidence de l'eau dans l'aquifère. La perméabilité est un facteur clé contrôlant la vitesse d'infiltration et de l'écoulement de l'eau dans l'aquifère. Des perméabilités de l'ordre de 10^{-2} à 10^{-5} m/s permettent l'infiltration de quelques mètres d'eau par jour dont la température de l'eau influence les taux d'infiltration pouvant varier d'environ 30 à 35% entre les périodes estivales, plus favorables, et hivernales. La perméabilité de l'aquifère doit être suffisante pour permettre la constitution d'un stock mobilisable, et assurer l'écoulement de l'eau vers le point de récupération. Toutefois, une perméabilité trop élevée favoriserait un transfert rapide vers les exutoires naturels et limiterait la capacité de stockage et l'efficacité des processus d'épuration. Au contraire une perméabilité trop faible limiterait l'infiltration et les écoulements dans l'aquifère produisant alors, soit un débordement au niveau du dispositif de recharge en surface (bassin, tranchée, …), soit une surpression au niveau du puits d'injection, soit une déconnexion nappe-rivière dans le cas de filtration par berges. L'aquifère ciblé peut être d'épaisseur variable, tout dépend de l'objectif de recharge maîtrisée des aquifères, allant d'une dizaine de mètres à plus de 200m. Les valeurs recherchées d'épaisseur et de porosité (coefficient d'emmagasinement), et selon les cas d'épaisseur de zone non saturée, doivent être maximales afin de pouvoir bénéficier d'une capacité de « stockage » significative. Quel que soit le dispositif, la diffusivité de l'aquifère (rapport de la transmissivité (perméabilité rapportée à la section d'écoulement) à l'emmagasinement) ne doit pas être trop élevée pour que le stockage dans la nappe soit efficace. Dans des contextes bien caractérisés, la modélisation hydrodynamique, fondées sur des essais in situ ou d'investigations, permet d'évaluer la réponse du système aquifère, d'anticiper l'évolution des niveaux piézométriques, d'optimiser le dimensionnement du dispositif afin de limiter les pertes, les débordements et maximiser l'efficacité du stockage. Par ailleurs, dans le cadre de la mise en œuvre de recharge maitrisée des aquifères, tout processus affectant les propriétés aquifères devra également être finement étudié afin d'éviter ces risques (effet de colmatage de l'aquifère ou du dispositif de recharge).

Colmatage des aquifères, des dispositifs de recharge et d'exploitation : selon la qualité de l'eau utilisée pour la recharge maîtrisée des aquifères le colmatage des zones d'infiltration ou d'injection peut se produire. Ce phénomène entraîne une fermeture de la porosité, une diminution locale de la perméabilité et un confinement géochimique du milieu. Par ailleurs, le colmatage provoque une diminution de la vitesse d'écoulement de l'eau ainsi que du débit infiltré ou injecté. Dans le cas d'une recharge par infiltration, le colmatage affecte surtout la surface d'infiltration, le fond des bassins, les parois des tranchées et les puits. Pour la recharge par injection directe dans la nappe, le colmatage se produit principalement au niveau de l'interface puits-aquifère (Bize *et*

al., 1972; Bouwer, 2002). Le colmatage résulte principalement de trois processus : la fixation des matières en suspension (MES) et des gaz présents dans l'eau (processus physique), les réactions entre l'eau de recharge, l'eau de la nappe et les terrains encaissants (processus chimique), ainsi que le développement de micro-organismes tels que les bactéries, algues ou plus rarement champignons (processus biologique). Toutes les installations de recharge maîtrisée des aquifères sont concernées et le risque de colmatage dépend de l'adéquation entre la qualité de l'eau utilisée pour la recharge, le pré-traitement, le dispositif de recharge, la qualité de l'eau souterraine initiale et les caractéristiques géochimiques de l'aquifère ciblé. Bien que des techniques de décolmatage existent, la prévention reste essentielle. Elle repose notamment sur le prétraitement de l'eau, la réduction des MES et l'aération des horizons superficiels. L'entretien régulier des bassins (curage, grattage) et l'alternance de phases d'infiltration et de séchage permettent également de restaurer la perméabilité. Cependant, lors d'une infiltration en zone saturée, le colmatage profond reste difficile à éliminer. Dans le cadre de la mise en œuvre de la recharge maîtrisée des aquifères, tout processus menant au colmatage du dispositif de recharge ou de l'aquifère devra également être finement étudié en amont afin de pérenniser les installations.

Risques liés à la qualité de l'eau

Les risques liés á la qualité de l'eau doivent être pris en compte au regard des enjeux de santé publique et de protection de l'environnement mais aussi au regard de la pérennité des capacités d'écoulement du système de recharge maîtrisée des aquifères (colmatage du système). Ces risques peuvent provenir de différentes sources : de l'eau utilisée pour la recharge, des eaux souterraines natives, ou encore des réactions physico-chimiques susceptibles de se produire lors des phases de recharge et de « stockage », entre l'eau de recharge et les eaux souterraines ou entre l'eau de recharge et les roches constituant l'aquifère. Les risques liés à la qualité de l'eau dépendent des vitesses d'écoulement dont leur étude doit être conjointe. Les principales catégories de risques liés à la qualité de l'eau sont présentés dans cette section, qui s'appuie principalement sur les rapports de l'ANSES (2016) et Dillon *et al.* (2022).

Pathogènes : Les agents pathogènes constituent l'un des principaux risques sanitaires liés à la qualité de l'eau, en raison de la fréquence de leur présence, de leur pouvoir de développement et de leurs impacts potentiellement graves sur la santé humaine. Ils regroupent notamment les bactéries, virus, protozoaires et helminthes, dont la présence et dangerosité dépendent de leur concentration, de leur dispersion et de leur capacité de survie dans l'environnement. Du fait de pollutions d'origine anthropique mais également d'origine naturelle, des organismes pathogènes peuvent être présents dans les eaux superficielles (cours d'eau, lacs, eaux marines) et dans les eaux souterraines notamment les milieux karstiques ou fissurés. Les bactéries et les parasites sont plus rarement détectés dans les autres types de nappes d'eaux souterraines : kystes de protozoaire et œufs d'helminthes sont très vite arrêtés en milieu poreux du fait de leur taille ; les bactéries sont éliminées en partie par le sous-sol ; le comportement des virus est beaucoup moins bien connu (des dispositifs réalisés à l'échelle de grandes agglomérations montrent que certains virus issus d'effluents « désinfectés » peuvent encore être présents après infiltration dans le sol et circulation et filtration à travers plusieurs centaines de mètres d'aquifère poreux). Les aires d'alimentation de captage d'eau potable, les nappes libres karstiques (et, dans une moindre mesure, les autres nappes), les bassins versants concernés par des activités de baignade, conchylicoles ou autres (cressonnières) sont particulièrement vulnérables. Lors de la recharge maîtrisée des aquifères, ces micro-organismes proviennent principalement de l'eau de recharge si les traitements ne sont pas adaptés, et peuvent déjà être en présence dans les eaux souterraines natives. Leur devenir dans le milieu souterrain est variable. Ils peuvent être inactivés ou retenus par adsorption dans les sols et aquifères, sous l'influence de la température, les conditions géochimiques, le type d'aquifère, ou l'activité biologique. Certains pathogènes peuvent persister malgré les traitements, y compris lorsque les indicateurs microbiologiques sont absents.

Comme l'indiquait l'ANSES (ANSES, 2016) dans un exemple, l'eau qui a été désinfectée par chloration ou UV ne sera pas nécessairement exempte d'entérovirus ou de kystes de certains parasites (comme Cryptosporidium ou Giardia). Cette question est particulièrement importante dans le contexte de l'utilisation des eaux usées traitées, sachant que l'eau usée est une source importante de microorganismes pathogènes fécaux (OMS, 2003).

Contaminants chimiques inorganiques : Les substances chimiques inorganiques constituent une large catégorie de risques, incluant les métaux, métalloïdes, ions (particulièrement chlorates, perchlorates et nitrates) et gaz, pouvant affecter la santé humaine et l'environnement. Elles peuvent provenir de l'eau de recharge, des eaux souterraines natives, ou des interactions des eaux avec les éléments constituant les roches de l'aquifère. Leur présence peut entrainer des dépassements de seuils pour des éléments comme le fer, le manganèse, l'arsenic ou le sulfure d'hydrogène, ainsi que des modifications de la composition chimique de l'eau. Les aquifères peuvent toutefois jouer un rôle d'atténuation via des processus naturels de dilution, de filtration, d'adsorption ou de précipitation. Une évaluation géochimique est donc essentielle pour anticiper les évolutions de qualité. La gestion de ces risques repose sur le suivi et le contrôle des eaux utilisées pour la recharge maîtrisée des aquifères et des processus de traitement de l'eau. La capacité d'épuration naturelle des aquifères traversés par l'eau, en particulier sur les sites d'infiltration en surface, contribue à réduire les risques de contamination. La concentration en MES constitue toutefois un paramètre critique. En effet, lorsqu'ils ne sont pas retenus dans le milieu poreux de l'aquifère, les MES peuvent servir de support aux micro-organismes, aux nutriments et aux contaminants, y compris pathogènes, ce qui peut diminuer l'efficacité des traitements et présenter un risque sanitaire. Et comme décrit ci-dessus, les MES retenues par le milieu poreux entrainent le colmatage des dispositifs de recharge maîtrisée des aquifères. L'utilisation d'eaux stockées dans les lacs ou les retenues est souvent préférable (comme tous dispositifs permettant la décantation des eaux brutes riches en MES en amont d'un système de recharge maîtrisée des aquifères), car elles contiennent généralement moins de MES. Pour la recharge indirecte, une turbidité inférieure à 10 NTU est généralement recommandée pour éviter la détérioration du puits d'injection (ANSES, 2016).

Contaminants chimiques organiques : les éléments chimiques organiques dans l'eau désignent l'ensemble des composés contenant du carbone d'origine naturelle ou anthropique. Les contaminants organiques présents dans l'environnement (sols, eaux de surface, eaux souterraines mais aussi eaux usées urbaines et industrielles) sont essentiellement issus des activités humaines et concernent une grande variété de molécules : les produits phytosanitaires (atrazine, glyphosate, métolachlore), les médicaments (ibuprofène, carbamazépine, diclofénac), les solvants chlorés (trichloréthylène, tétrachloréthylène), les hydrocarbures (BTEX, HAP), les perturbateurs endocriniens (bisphénol A, phtalates, nonylphénols), les PFAS (composés per- et polyfluoroalkylés). Ces substances jouent un rôle fondamental dans la qualité de l'eau, son écotoxicité et sa potabilité. Ces éléments sont souvent présents à la surface et dans les sols (agricoles et urbains) et circulent dans l'eau sous formes dissoute ou particulaire et peuvent ainsi contaminer les sols et roches du sous-sol, les eaux de surface, les eaux souterraines soit par ruissellement ou infiltration. Les sols agricoles sont essentiellement contaminés par les polluants organiques du fait de l'utilisation de produits phytosanitaires et de l'épandage de produits résiduaires organiques (boues, composts, lisiers). Les produits phytosanitaires peuvent se dégrader dans le sol sous l'action de microorganismes spécifiques en métabolites. La plupart de ces produits de dégradation sont également des molécules organiques contaminantes. Les sols peuvent être également contaminés par d'autres contaminants comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et Dioxine produits principalement par combustion des matières organiques (feux de forêt, incinérateurs, combustion d'énergies fossiles) et se propagent par voie atmosphérique. Les concentrations maximum admissibles dans l'environnement et l'eau potable sont régies pour certaines molécules organiques dont les produits phytosanitaires par les directives européennes.

Comme pour les contaminants chimiques inorganiques, une évaluation des éléments chimiques organiques est indispensable aussi bien concernant les eaux utilisées pour la recharge maîtrisée des aquifères que l'environnement (sol, roche et eaux) constituant le milieu récepteur de ces eaux. Les processus de sorption, dégradation et dilution ayant lieu dans l'aquifère peuvent participer à l'atténuation naturelle de ces éléments, néanmoins les risques de contamination sont à évaluer et à surveiller pour ne pas dégrader la qualité des eaux souterraines par l'introduction de ces éléments.

Contaminants émergents : les contaminants émergents regroupent un large ensemble de composés récemment étudiés, pour lesquels les données environnementales et écotoxicologiques disponibles restent limitées ou pour lesquels il n'existe pas de programmes de surveillance de routine au niveau européen et qui pourraient faire l'objet d'une future réglementation, bien qu'ils soient utilisés depuis longtemps. Généralement dépourvus de cadre règlementaire, ils ne font pas systématiquement l'objet d'un suivi dans les eaux. Une liste des substances émergentes et des polluants émergents faisant l'objet de discussions les plus fréquentes est établie par NORMAN[12] (voir « NORMAN Database System – Substance Database »). Parmi eux, figurent notamment certains produits pharmaceutiques et leurs produits de dégradation, les hormones, les antibiotiques, certains produits phytosanitaires et leurs produits de dégradation, les détergents, les phtalates, les retardateurs de flammes ou encore les substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS), les micro- et nanoplastiques et nano-matériaux. Les produits pharmaceutiques sont particulièrement étudiés en raison de leur diversité et de leur présence fréquente dans les eaux usées, principale source de contamination, notamment via l'excrétion humaine, les rejets hospitaliers ou les activités agricoles ou aquacoles. Les produits pharmaceutiques rejetés par les exploitations agricoles sont essentiellement des produits vétérinaires, notamment des antiparasitaires et des antibiotiques. Lors du traitement des eaux usées, l'élimination de ces substances est variable et souvent incomplète, certains composés étant transformés en métabolites encore actifs. Dans le cadre de la recharge maîtrisée des aquifères, l'utilisation d'eaux de surface ou usées traitées peut favoriser l'introduction de contaminants émergents vers les aquifères (Mumberg *et al.*, 2024). Ce processus constitue alors une voie directe de transfert vers les ressources en eau potable. Parmi ces contaminants, les PFAS présentent un risque particulier et se distinguent des autres contaminants organiques persistants par leurs propriétés et leur comportement dans le sous-sol (Mumberg *et al.*, 2024). La gestion des contaminants émergents dans la recharge maîtrisée des aquifères nécessite un suivi régulier des eaux et une meilleure prise en compte des substances non règlementées. Il est crucial d'adapter les dispositifs de recharge maîtrisée des aquifères (intégration de prétraitement, technique spécifique d'infiltration), afin de favoriser les réactions hydro(bio)géochimiques et de limiter leur diffusion dans les eaux souterraines.

Impacts environnementaux

La recharge maîtrisée des aquifères peut engendrer plusieurs impacts environnementaux qu'il est impératif d'évaluer en amont. L'injection ou l'infiltration d'eau modifie les régimes hydrauliques naturels, ce qui peut entrainer des variations des niveaux piézométriques, des changements de direction des écoulements souterrains et une altération des échanges nappe-rivière. Ces modifications peuvent affecter le fonctionnement des écosystèmes dépendant de la nappe, notamment en zone humide. Par ailleurs, un risque de dégradation de la qualité des eaux souterraines existe, en particulier lorsque la qualité de l'eau de recharge est insuffisante ou mal maitrisée. Des phénomènes de transport de polluants, de mobilisation d'éléments présents dans la matrice aquifère, ainsi que des réactions géochimiques peuvent survenir (cf. section 2.4.2). Par ailleurs, des impacts indirects peuvent apparaitre, liés aux aménagements nécessaires en

[12] https://www.norman-network.com/nds/susdat/

surface et aux modifications des usages des sols. Les projets susceptibles d'être réalisés à proximité de sites et sols pollués, d'une zone protégée ou d'un périmètre de protection de captage font l'objet d'un point de vigilance supplémentaire dans l'évaluation environnementale du projet. Enfin, l'eau introduite volontairement dans un aquifère peut engendrer des effondrements des terrains dans certains cas spécifiques d'aquifères karstifiés.

Risques socio-économiques

La mise en œuvre de la recharge maîtrisée des aquifères peut s'accompagner de plusieurs risques socio-économiques qu'il est impératif d'anticiper dès les premières phases du projet. Sur le plan social, la réception publique des projets constitue un enjeu majeur, en raison des inquiétudes liées à l'exploitation de ressources en eau jugées limitées, aux risques de contamination des nappes ou encore aux impacts potentiels sur la santé humaine et l'environnement (Imig *et al.*, 2022). A cela s'ajoute une réticence possible des usagers face à une augmentation du coût de l'eau. Le manque d'information et de communication peut aussi renforcer ces préoccupations, soulignant l'importance d'une démarche transparente et d'une implication des parties prenantes dès les premières phases de réflexions. Par ailleurs, certains usages locaux autour des ouvrages ou les contraintes foncières, comme la perte de terres agricoles peuvent générer des tensions (Imig *et al.*, 2022).

Sur le plan économique, les principaux risques concernent le financement des projets, souvent contraint par des capacités d'investissement limitées et par un décalage entre les coûts initiaux et les bénéfices attendus (Imig *et al.*, 2022). Des incertitudes existent également en phase d'exploitation, en cas de performances insuffisantes ou de coûts de maintenance élevés liés à des phénomènes comme le colmatage. Enfin, la rentabilité des projets dépend fortement de la demande en eau, elle-même variable selon les conditions climatiques et la perception des usagers quant à la qualité de l'eau produite (Rupérez-Moreno *et al.*, 2017).

Ainsi, les facteurs sociaux, notamment la réception par la communauté des projets, l'accès équitable, l'implication des parties prenantes et les répercussions socio-économiques, ont une influence considérable sur la faisabilité et l'efficacité des initiatives de recharge maîtrisée des aquifères (Castro-Diaz *et al.*, 2026). En tenant soigneusement compte de ces aspects, les décideurs politiques et les porteurs de projet peuvent adresser les obstacles sociaux potentiels, renforcer la confiance de la communauté et veiller à ce que les bénéfices soient répartis équitablement (Castro-Diaz *et al.*, 2026).

En définitive, les risques quantitatifs et qualitatifs sont étroitement liés au sein des systèmes de recharge maitrisée des aquifères. Les conditions d'écoulement et de stockage de l'eau dans l'aquifère influencent directement l'évolution qualitative des eaux et les phénomènes affectant la qualité de l'eau (comme le colmatage) peuvent modifier les performances hydrauliques du système. Une analyse conjointe de ces deux dimensions est donc indispensable pour assurer la viabilité et la pérennité des projets de recharge maitrisée des aquifères.

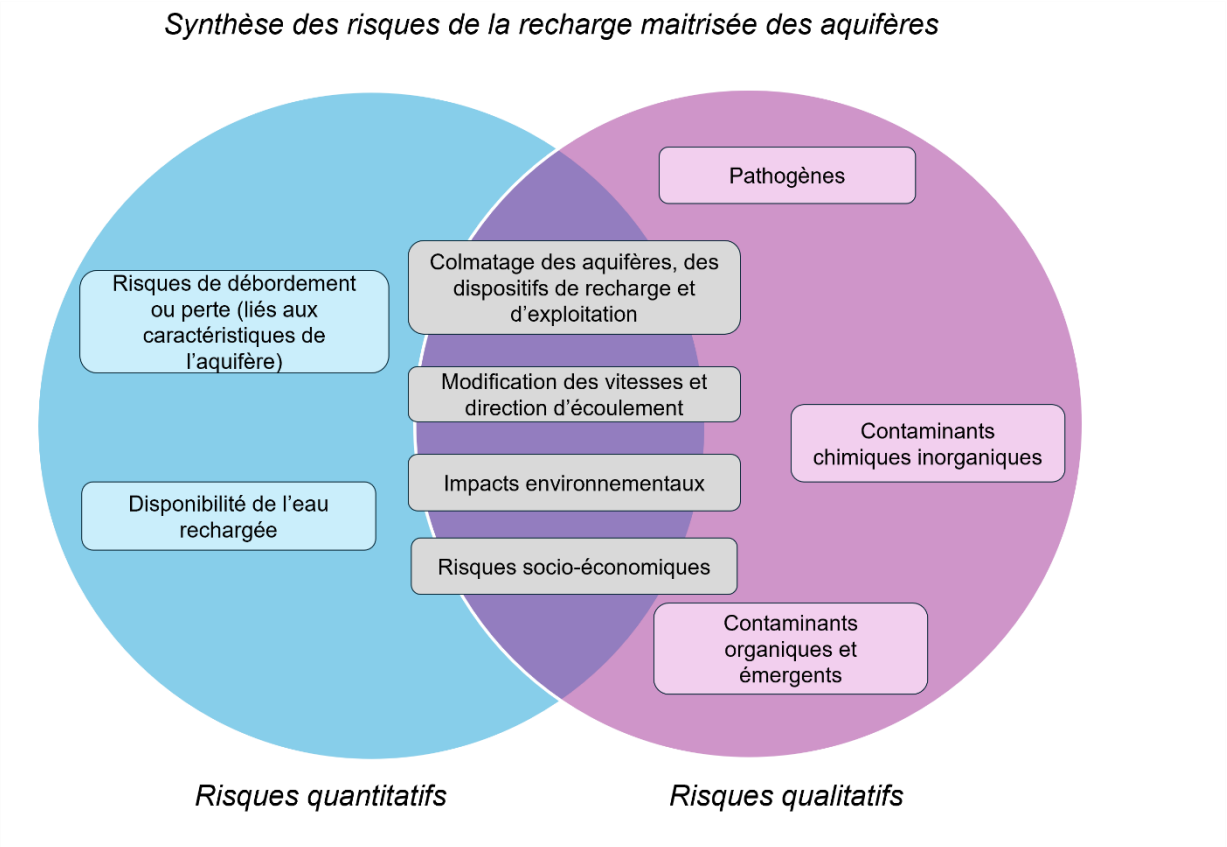


Figure 7 : Synthèse des risques associés à la recharge maitrisée des aquifères

Comment réduire ces risques et impacts ?

L'approche « multi-barrières » est un concept clé dans la gestion des risques liés à la recharge maîtrisée des aquifères qui fait intervenir à chaque étape de mise en place du système différents acteurs agissant de manière planifiée selon un cadre réglementaire. Cette approche est largement reconnue comme un moyen de protéger la qualité de l'eau potable (OMS 2006). La mise en œuvre de l'approche multi-barrières dans le cadre du plan de gestion des risques liés à la recharge maîtrisée des aquifères doit englober tous les éléments du système de recharge maîtrisée des aquifères et être soumise à l'autorité de régulation des projets de la juridiction concernée pour examen et approbation.

Pour une gestion des risques, il est pertinent de mettre en place :

- Une analyse et une gestion du système de recharge maîtrisée des aquifères : Évaluation du système de recharge maîtrisée d'aquifère, Mesures préventives pour la gestion de l'eau issue du système, Procédures opérationnelles et contrôle des processus, Vérification de la qualité de l'eau issue du système et de la performance environnementale, Gestion des incidents et des urgences.
- Des exigences complémentaires : Sensibilisation et formation des employés, Participation de la communauté, Recherche et développement, Documentation et rapports.
- Une révision : Évaluation et audit, Révision et amélioration continue.

Afin d'identifier et de gérer l'ensemble des risques pour la santé et l'environnement ainsi que les risques associés au système de recharge maîtrisée d'aquifère, les promoteurs doivent disposer d'une connaissance approfondie et documentée de l'ensemble du système depuis les sources d'eau utilisée pour la recharge jusqu'aux utilisations de l'eau récupérée, en passant par le devenir

de l'eau de recharge dans l'aquifère incluant sa minéralogie (cf. Figures au 2.2) et l'environnement dans lequel le système de recharge maîtrisée des aquifères s'inscrit. Des recherches intensives doivent être menées sur l'aquifère et son environnement avant la mise en œuvre du dispositif de recharge maîtrisée des aquifères afin de déterminer un niveau de traitement approprié pour l'eau à recharger, qui tienne compte des réactions biogéochimiques se produisant dans les aquifères lorsque de nouvelles sources d'eau y sont introduites. Un système durable exige une conception adaptée au contexte local, des contrôles rigoureux de la qualité des eaux rechargées et un système de suivi environnemental à long terme.

La réduction des risques passe par un investissement non négligeable sur la connaissance du milieu et du sous-sol. Du fait de l'histoire géologique de formation du sous-sol, les propriétés des roches aquifères et des eaux souterraines sont souvent hétérogènes et parfois complexes à identifier avec précision et certitude. De plus, le système de recharge maîtrisée des aquifères s'inscrit dans la dynamique du cycle de l'eau parfois pluriannuel (nappe inertielle) dont les interactions avec les processus géogènes et anthropiques peuvent être multiples et dont les projections futures présentent également une part d'incertitude. De nombreux outils et méthodes existent pour étudier finement le milieu souterrain et la dynamique d'écoulement, qui lorsqu'ils sont déployés suffisamment en amont d'un projet de recharge maîtrisée des aquifères, permettent de réduire les incertitudes, de bâtir un modèle conceptuel d'écoulement robuste, de conceptualiser un système de recharge maîtrisée des aquifères adapté, de maintenir un système pérenne et de réduire les risques d'impact sur l'environnement et la santé qui lui sont associés.

Par ailleurs l'implication des différents acteurs en amont (usagers, services de l'état, …) permet d'imaginer les dispositifs les plus adaptés aux besoins et aux contraintes de tous, et facilite la mise en œuvre des systèmes par la participation au projet des différents acteurs (valeurs et intérêts, contraintes individuelles et collectives ou encore facteurs pouvant conduire à une meilleure adéquation des projets à la société). Il important de gérer de front les approches technico-économiques et approches sociales, les deux étant indissociables et devant être enclenchées ensemble pour mener plus sûrement les projets à bonne fin (Zheng *et al.,* 2021).

Le cadre réglementaire, présenté dans le chapitre suivant joue un rôle central dans la maitrise et la réduction des risques précédemment identifiés.

3. Cadre règlementaire

3.1. PRINCIPES ET TEXTES GENERAUX

À ce jour, le cadre de mise en œuvre de système de recharge maîtrisée des aquifères repose sur plusieurs textes règlementaires et documents de références (Directives européennes, codes, lois, décrets, stratégies, plans, etc.) mobilisés à plusieurs échelles (Figure 8) : échelle européenne, échelle nationale, échelle du territoire (administrative et hydrographique).Les documents sur lesquels s'appuyer dépendra du système de recharge maîtrisée des aquifères à mettre en œuvre et du contexte dans lequel il s'inscrit.

A l'échelle européenne, le cadre réglementaire s'appuie sur des directives européennes et particulièrement sur la **directive-cadre sur l'eau**[13] dite DCE (et la directive sur la protection des eaux souterraines), la **directive concernant l'évaluation des incidences de certains projets publics et privés sur l'environnement**[14], ainsi que la **directive relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine**[15]. A l'échelle nationale, ces textes ont été transposés principalement dans le **code de l'environnement** et le **code de la santé publique**, notamment, pour ce qui concerne la directive cadre sur l'eau, à travers l'adoption de **la loi sur l'eau** du 30 décembre 2006[16]**.** A l'échelle territoriale, ce cadre s'inscrit dans les orientations du **Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux** (SDAGE), et plus localement avec le **Schéma d'aménagement et de gestion des eaux** (SAGE) et le **Projet de Territoire pour la Gestion de l'Eau** (PTGE).

La réglementation française doit respecter les règles édictées par la législation de l'UE, c'est une transposition directe des textes de l'UE (Figure 8). Elle repose sur plusieurs grands principes : « **eau patrimoine commun** », « **pollueur payeur** », « **l'eau paye l'eau** » et « **une seule santé** » **qui à la fois contraignent et impulsent la réalisation des projets de recharge maîtrisée des aquifères**. Dans le code de l'environnement, et dans les arrêtés ministériels pris pour son application, sont inscrits les moyens de protection de l'environnement, de gestion intégrée de la ressource en eau et de son utilisation durable pour préserver ou rétablir le bon état des masses d'eau (eau de surface, eau souterraine, eau estuaires et côtières) tant en quantité qu'en qualité. Ces textes définissent ainsi des « **objectifs environnementaux** » à atteindre à l'échelle nationale mais c'est **à l'échelle du territoire** administratif (région, département, communes) et du territoire hydrographique (bassin et sous-bassin hydrographiques) que s'organise et se planifie la protection de l'environnement et la gestion équilibrée de la ressource en eau. Cette gestion territoriale s'organise via le SDAGE (bassin hydrographique), le SAGE (sous-bassin hydrographique) et le PTGE[17] dont les instances (comités de bassin, commission locale de l'eau (CLE), comité de pilotage), lieux de concertation, suivent, planifient, encadrent et décident des orientations et programmes de mesures à prendre selon les spécificités du territoire et de l'état

[13] DIRECTIVE (UE) 2026/805 modifiant au 20 avril 2026 la Directive Cadre sur l'Eau - 2000/60/EC, la Directive sur la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration - 2006/118/CE, la Directive établissant des normes de qualité environnementale dans le domaine de l'eau 2008/105/CE

[14] **Directive 2011/92/UE du Parlement européen et du Conseil du 13 décembre 2011 concernant l'évaluation des incidences de certains projets publics et privés sur l'environnement**

[15] **Directive (UE) 2020/2184 du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2020 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine**

[16] Loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques

[17] Guide et référence documentaire sur les SDAGE, SAGE et PTGE via https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/gestion-leau-france#la-gouvernance-de-la-politique-de-leau-4 et https://www.gesteau.fr/

des masses d'eau et des écosystèmes aquatiques associés. La mise en place d'un projet de recharge maitrisée des aquifères nécessite **une procédure de déclaration et d'autorisation** définie par le code de l'environnement. Elle vise à évaluer, accepter ou refuser et suivre les installations, ouvrages, travaux ou activités (définie sous la nomenclature « IOTA ») « réalisés à des fins non domestiques par toute personne physique ou morale, publique ou privée, et entraînant des prélèvements sur les eaux superficielles ou souterraines, restitués ou non, une modification du niveau ou du mode d'écoulement des eaux, la destruction de frayères, de zones de croissance ou d'alimentation de la faune piscicole ou des déversements, écoulements, rejets ou dépôts directs ou indirects, chroniques ou épisodiques, même non polluants »[18]. La liste des installations, ouvrages, travaux ou activités concernés est établie par décret dans une nomenclature figurant à l'article R214-1 du code de l'environnement (« nomenclature IOTA »).

Le code de l'environnement prévoit que soient **soumis à autorisation de l'autorité administrative** « les installations, ouvrages, travaux et activités susceptibles de présenter des dangers pour la santé et la sécurité publique, de nuire au libre écoulement des eaux, de réduire la ressource en eau, d'accroître notablement le risque d'inondation, de porter gravement atteinte à la qualité ou à la diversité du milieu aquatique, notamment aux peuplements piscicoles. Cette autorisation est l'autorisation environnementale »[19]. Lorsqu'il s'agit de prélèvements en eau superficielle ou de déversements, ainsi que toute installation de pompage des eaux souterraines sont exigés « des **moyens de mesure** ou d'**évaluation appropriés** ». Dans ce cas, les exploitants ou, s'il n'existe pas d'exploitants, les propriétaires des installations soumises à autorisation ou à déclaration mettent les moyens et les dispositifs de mesure ou d'évaluation **en conformité avec les caractéristiques techniques fixées par arrêté** du ministre chargé de l'environnement dans les délais fixés par ce même arrêté.

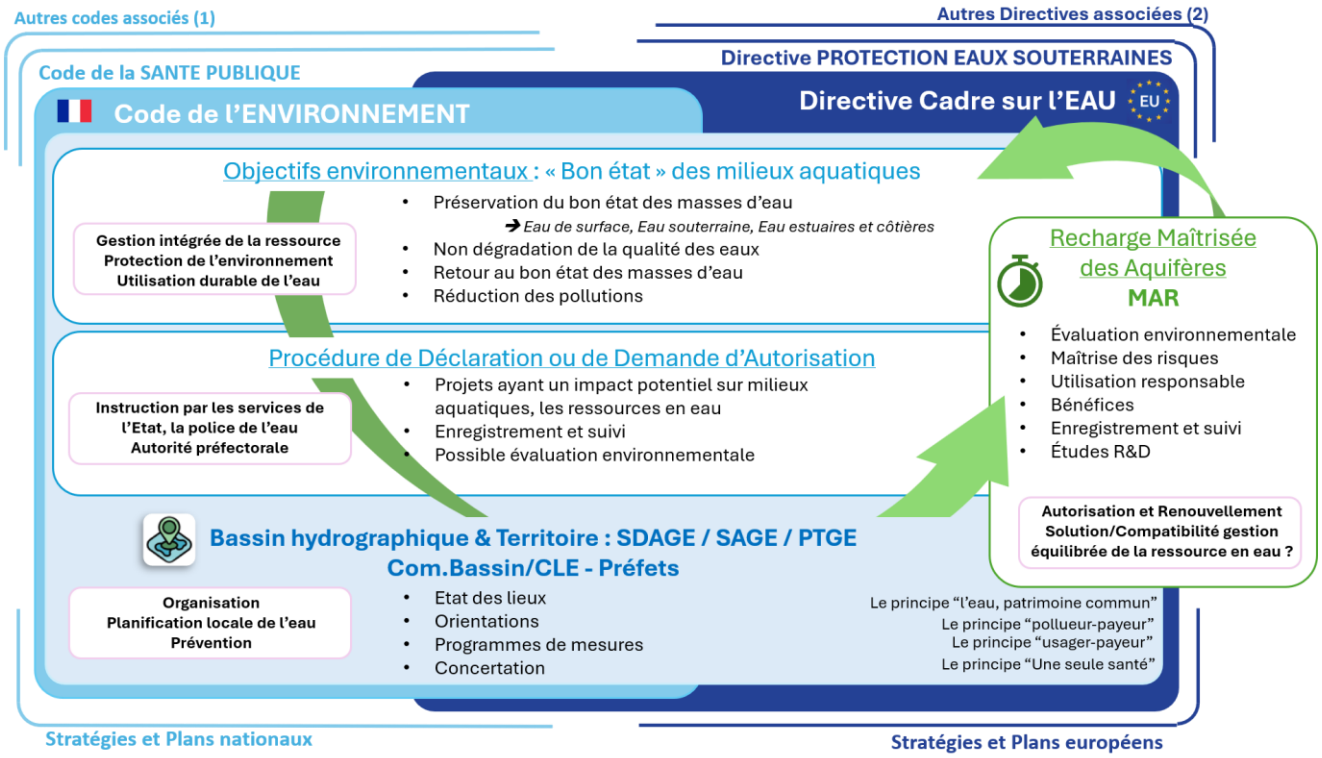
Les systèmes de recharge maîtrisée d'aquifère sont dès lors encadrés par le code de l'environnement de façon à ne pas ne pas détériorer les masses d'eau par rapport à leur état initial. Leur développement peut être encouragé **par les programmes de mesures** établis pour atteindre le bon état quantitatif et qualitatif des masses d'eau et pour rendre durable la gestion équilibrée de la ressource en eau sur un territoire. **Les systèmes de recharge maîtrisée des aquifères font l'objet d'une démarche d'évaluation environnementale[20] allant de la planification de leur mise en œuvre à l'évolution des caractéristiques techniques de conformité lors du renouvellement de l'autorisation préfectorale** permettant alors de maîtriser les risques et mesurer les bénéfices de ces systèmes. L'évaluation de l'impact environnemental constitue un élément clé dans la conception des systèmes de recharge maîtrisée d'aquifère et dans la décision de leur mise en œuvre. Dans ce cadre, la caractérisation de l'état initial des milieux aquatiques et leur suivi sur le long terme représentent un enjeu majeur.

Au regard des exigences de non-détérioration des masses d'eau et des écosystèmes aquatiques associés**,** la stratégie européenne (European Commission, 2024) indique que **la conformité d'un système de recharge maîtrisée d'aquifère s'appuie en premier lieu sur le point d'entrée dans la nappe d'eau souterraine, c'est-à-dire dans la zone saturée de l'aquifère**. A partir de la diversité des systèmes de recharge maîtrisée des aquifères, il est important de les classer de façon à distinguer les systèmes « directs » des systèmes « indirects » (cf. 2.2). **Les systèmes indirects** correspondent à un processus dans lequel le point d'entrée de l'eau de recharge se trouve dans la zone non saturée et où, par conséquent, l'eau de recharge doit traverser la zone non saturée avant de pénétrer dans la nappe ciblée. Spécifiquement pour les systèmes de recharge maîtrisée d'aquifère indirects, les processus d'atténuation naturelle ayant

[18] Article L214-1 du code de l'environnement
[19] Article L214-3 du code de l'environnement
[20] Annexe à l'article R122-2 du code de l'environnement

potentiellement lieu lors du passage au travers de la zone non saturée doivent être finement étudiés lorsqu'il s'agit d'eau utilisée pour la recharge de moindre qualité que celle de la nappe ciblée. **Les systèmes directs** correspondent à un processus dans lequel le point d'entrée de l'eau de recharge se trouve dans la zone saturée et donc directement dans la nappe ciblée, imposant des exigences plus strictes en matière de qualité de la ressource en eau utilisée et de son contrôle lors de l'injection car les systèmes directs ne bénéficient pas de l'effet potentiel d'atténuation de la zone non saturée contrairement aux systèmes indirects. Pour les deux ensembles de systèmes de recharge maitrisée des aquifères, indirect et direct, l'accent doit être mis sur la qualité de l'eau utilisée pour recharger l'aquifère, qui constitue un facteur critique pour se conformer aux exigences du code de l'environnement et de la directive cadre sur l'eau.

Selon le système de recharge maîtrisée d'aquifère en question (techniques de recharge, eau utilisée pour la recharge, propriétés de l'aquifère et des eaux souterraines, usages des eaux souterraines, objectifs de mise en place du système de recharge maîtrisée des aquifères, etc.), d'autres directives européennes et codes nationaux devront être également pris en compte afin d'orienter et encadrer les pratiques.



(1) selon les cas de recharge maîtrisée des aquifères, plusieurs codes : santé publique, collectivités territoriales, minier, urbanisme, construction et habitation rural et de la pêche maritime, civil, général de la propriété des personnes publiques, procédure pénale, consommation, forestier, impôts, …

(2) selon les cas de recharge maîtrisée des aquifères, plusieurs DIRECTIVES EUROPEENNES : eau souterraine, eau potable, évaluation incidences environnementales, normes de qualité environnementale, eaux résiduaires urbaines, gestion de la qualité des eaux de baignade, nitrates, protection de l'environnement par le droit pénal, gestion des inondations, conservation des habitats naturels, conservation des oiseaux sauvages, …

Figure 8 : Cadres réglementaires multi-échelles applicables à la recharge maitrisée des aquifères

A ce jour, la terminologie « recharge maîtrisée d'aquifère » se reportant à la terminologie récente international « Managed Aquifer Recharge – MAR » n'est pas utilisée dans les documents réglementaires français et européens (cf. 2.1). Seules les terminologies « Recharge Artificielle des eaux souterraines » et « Rejet sur le sol ou dans le sous-sol » (d'eau pluviale ou d'effluents)[21], pouvant s'y reporter sont utilisés (Annexe 2 - A).

En complément des textes réglementaires, plusieurs stratégies et plans nationaux et européens ainsi que des avis et recommandations sont d'intérêt en l'absence de guide technique dédié à ces systèmes de recharge maîtrisée des aquifères national :

- Stratégies, pactes, plans et recommandations européennes : Stratégie de mise en œuvre de la recharge maîtrisée d'aquifère (Managed aquifer recharge (MAR)), Stratégie de mise en œuvre de la directive-cadre sur l'eau et de la directive sur les inondations, Stratégie pour la résilience de l'eau, Stratégie pour l'adaptation au changement climatique, Pacte vert, Pacte pour une industrie propre, Plan « Zéro pollution », Vision pour l'agriculture et l'alimentation, Exigences minimales de qualité pour la réutilisation de l'eau dans l'irrigation agricole et la recharge des aquifères (JRC).
- Stratégies, plans et recommandations nationaux : Plan Eau, Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC), Stratégie nationale pour la biodiversité (SNB 2030), Objectifs de développement durable (ODD), Avis ANSES, …

Ces documents permettent de définir les contours réglementaires et les recommandations relatives à la mise en place des systèmes de recharge maîtrisée d'aquifère bien qu'à ce jour **ils constituent un cadre réglementaire non unifié et non homogène. En France, il n'existe pas d'arrêté ministériel fixant les prescriptions techniques générales applicables à la « recharge maîtrisée des aquifères », comme pour d'autres rubriques de la nomenclature IOTA, et les pratiques techniques restent à étudier et à définir au cas par cas en s'appuyant sur les différents documents évoqués. Ce sont en premier lieu les dispositions générales du code de l'environnement qui s'appliquent et qui définissent les attendus des études d'impact.** Les principaux éléments sont repris ci-après et plus en détail en Annexe 2 (B et C) sans prétendre être exhaustifs au vu de la diversité des systèmes de recharge maîtrisée des aquifères.

3.2. L'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE

La mise en œuvre d'un système de recharge maîtrisée d'aquifère peut engendrer un travail de construction, d'installation ou d'ouvrage réalisé dans le milieu naturel ou le paysage, en vue d'un usage des ressources en eau du sous-sol. Ces projets relèvent du champ de l'évaluation environnementale tel que défini par le Code de l'environnement via l'article R122-2 qui détermine la nomenclature des projets soumis à évaluation environnementale. Ces dispositions du code de

[21] Article R214-1 du code de l'environnement : les projets de recharge maîtrisée d'aquifère sont soumis à autorisation, sous la rubrique « 2.3.2.0. Recharge artificielle des eaux souterraines (A) » ; à autorisation ou déclaration sous la rubrique « 2.1.5.0. Rejet d'eaux pluviales dans les eaux douces superficielles ou sur le sol ou dans le sous-sol, la surface totale du projet, augmentée de la surface correspondant à la partie du bassin naturel dont les écoulements sont interceptés par le projet, étant : 1° Supérieure ou égale à 20 ha (A) ; 2° Supérieure à 1 ha mais inférieure à 20 ha (D) » ; à autorisation « 2.3.1.0. Rejets d'effluents sur le sol ou dans le sous-sol [...] (A) ».

l'environnement relatives à l'évaluation environnementale des projets de recharge résultent de la transposition de la directive 2011/92/UE sur l'évaluation environnementale (Annexe 1 – 11.).

Cette évaluation repose sur la réalisation d'une étude d'impact proportionnée aux enjeux du projet, intégrant l'analyse de ses effets sur les milieux naturels, les ressources en eau, la biodiversité, la santé humaine et le cadre de vie. Elle inclut également les mesures envisagées pour éviter les incidences négatives probables sur l'environnement, à en réduire les effets et, le cas échéant, à en compenser les impacts résiduels. Les modalités précises de mise en œuvre, le contenu attendu des études et les procédures d'instruction sont encadrés par les dispositions réglementaires (articles R.122-1 et suivants). La section 4.3 du présent rapport détaille les études et analyses associées à cette évaluation environnementale. L'autorité administrative peut s'opposer à l'opération projetée s'il apparaît qu'elle est incompatible avec les dispositions du schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) ou du schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE), ou porte atteinte aux intérêts mentionnés à l'article L. 211-1, une atteinte d'une gravité telle qu'aucune prescription ne permettrait d'y remédier.

La réglementation précise les types de dispositifs qui sont soumis à une évaluation environnementale systématique (autorisation) ou à un examen au cas par cas et en conséquence soumises à autorisation ou à déclaration. La problématique concernant les dispositifs de recharge maîtrisée des aquifères est que la terminologie n'existe pas à ce jour dans les textes de lois nationaux ni européens. A l'heure actuelle, il n'existe pas non plus de définition précise de la notion de « recharge artificielle des eaux souterraines » dans ces textes. Cette dernière est utilisée en annexe de l'Article R122-2 du code envt. au point 17 : « Dispositifs de captage et de recharge artificielle des eaux souterraines » reprise à l'article 2.2 de la directive 2000/60/ CE[22]). Selon les cas de recharge maîtrisée d'aquifère dont la mise en place ou la modification est envisagée il faudra définir à quel dispositif il fait référence dans les textes.

Les textes indiquent sans ambiguïté une procédure d'autorisation ou de déclaration qui demande une évaluation environnementale – étude d'impact (Article R122-2 du code envt. Annexe : nomenclature des projets soumis à évaluation environnementale). Dans ce cas les projets peuvent être soumis soit à une évaluation environnementale systématique (si le volume annuel d'eaux à recharger est supérieur ou égal 10 millions de mètres cubes), soit à un examen au cas par cas par l'autorité compétente (si le volume rechargé est <10 millions de mètres cubes).

En l'absence de définition précise dans les textes réglementaires, il est néanmoins possible de rattacher les systèmes de recharge maitrisée des aquifères à d'autres nomenclatures qui pourraient couvrir certains dispositifs. Ces systèmes sont compris dans la terminologie des systèmes de recharge maîtrisée d'aquifère désignés sous les termes « rejet par le sol ou dans le sous-sol » ou « évacuation dans le milieu récepteur » dans le cadre du traitement des eaux usées

[22] Indiqué à l'article 11-f) de la DCE que *« L'eau utilisée peut provenir de toute eau de surface ou eau souterraine, à condition que l'utilisation de la source ne compromette pas la réalisation des objectifs environnementaux fixés pour la source ou pour la masse d'eau souterraine rechargée ou augmentée. ».* Il ne semble pas y avoir de restrictions de principe concernant l'origine des eaux utilisées pour la recharge artificielle. La condition à respecter est que le projet ne détériore pas la masse d'eau et qu'il ne compromette pas la réalisation des objectifs de bon état. Au niveau national, le bon état chimique d'une masse d'eau souterraine est apprécié conformément à l'arrêté du 17 décembre 2008 établissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines et des tendances significatives et durables de dégradation de l'état chimique des eaux souterraines.

(Article R214-1 du code de l'environnement). Dans ce cas les projets sont soumis à une évaluation environnementale systématique, soit à un examen au cas par cas par l'autorité compétente selon la surface d'emprise au sol, la capacité de traitement de la station de traitement des eaux usées, la charge polluante, la localisation du dispositif sur le littoral[23] (cf. annexe à l'article R122-2). En cas d'évolution des textes de lois, il serait possible de modifier le positionnement de nomenclature du système de recharge maîtrisée des aquifères dans le cadre du renouvellement de permis.

Si le projet n'est pas soumis à étude d'impact, après examen au cas par cas, le porteur de projet doit toutefois réaliser l'étude d'incidences environnementales prévue à l'article R181-14 du code de l'environnement.

Le

[23] Article L. 121-16, article L. 121-45, article L. 121-23 du code de l'urbanisme

Tableau 1 regroupe les principaux éléments réglementaires applicables à la recharge maitrisée des aquifères, considérant la définition présentée en section 2.1 et la typologie de l'eau de recharge. Ce tableau n'est pas exhaustif et vise plutôt à fournir une vue d'ensemble des principaux cadres règlementaires plutôt qu'un inventaire complet.

Tableau 1 : Synthèse règlementaire et régime administratif selon les types d'eau utilisés pour recharger les aquifères

Type d'eau de recharge	Cadre réglementaire principal	Régime administratif	Interprétation
Eaux de surface (rivière, lac, …)	Directive 2000/60/CE + Code de l'environnement (R214-1 rubrique 2.3.2.0) Code env. R122-2	AUTORISATION préfectorale Évaluation environnementale systématique si ≥ 10 Mm³/an, ou au cas par cas si < 10 Mm³/an	Majorité des cas MAR en France
Eaux souterraines (transfert entre nappes)	Directive 2000/60/CE + Code de l'environnement (R214-1 rubrique 2.3.2.0) Code de l'environnement R122-2	AUTORISATION préfectorale Évaluation environnementale systématique si ≥ 10 Mm³/an, ou au cas par cas si < 10 Mm³/an	Cas MAR liés à des infrastructures (tunnels, travaux, …)
Eaux pluviales	Code de l'environnement R214-1 rubrique 2.1.5.0 et R214-1 rubrique 2.3.2.0 + Code Urb. R111-25-3	DÉCLARATION si surface < 20 ha, AUTORISATION préfectorale si surface > 20 ha	Évacuation des eaux, rejet sur le sol ou dans le sous-sol Évacuation des eaux, rejet sur le sol ou dans le sous-sol
Eaux usées traitées (STEU)	Code env. R214-1 Rubrique 2.1.1.0 + Arrêté du 21 juillet 2015 article 8 + Code collectivités territoriales Code env. R214-1 Rubrique 2.1.1.0 + Arrêté du 21 juillet 2015 article 8 + Code collectivités territoriales + Directive 2000/60/CE	DECLARATION Capacité de traitement comprise entre 12kg et 600 kg de DBO5 AUTORISATION préfectorale Capacité de traitement > à 600 kg de DBO5	Évacuation des eaux usées traitées vers le milieu récepteur (dont infiltration par le sol) Évacuation des eaux usées traitées vers le milieu récepteur (dont infiltration par le sol)
Eaux usées traitées (REUT agricole)	Règlement (UE) 2020/741	Autorisation spécifique REUT « directe » sans « stockage », passage par le milieu naturel (aquifère)	Peut contribuer indirectement à la recharge par excès d'irrigation. Pourrait être envisagée une réutilisation indirecte en stockant l'eau dans l'aquifère avant usage
Eaux industrielles traitées, effluents	Code env. R214-1 (IOTA / ICPE)	AUTORISATION préfectorale	Évacuation des eaux, rejet sur le sol ou dans le sous-sol

L'article 5 de la directive européenne sur l'évaluation d'incidences environnementales (2011/92/UE) précise le type d'informations devant être fournies dans le cadre de la procédure d'évaluation environnementale par le maître d'ouvrage aux autorités compétentes, ainsi qu'au public susceptible d'être concerné par le projet. Il rappelle également que les modalités de rédaction de chaque évaluation environnementale doivent être définies par chaque État membre (étapes détaillées cf. 4.3), soit en établissant une procédure spécifique, soit en l'intégrant à des procédures d'évaluation déjà existantes. Au regard des impacts potentiels liés à la construction et à l'exploitation de systèmes de recharge maîtrisée des aquifères, il est donc nécessaire de se référer à la Directive-cadre sur l'eau, qui vise à protéger et à gérer durablement les ressources en eau, en établissant un cadre législatif commun pour l'ensemble des États membres.

Les informations minimales que doit fournir le maître d'ouvrage sont les suivantes :

- Une description du projet comportant des informations relatives au site, à la conception et aux dimensions du projet.
- Une description des mesures envisagées pour éviter, réduire et, si possible, compenser les incidences négatives importantes.
- Les données nécessaires pour identifier et évaluer les principaux effets que le projet est susceptible d'avoir sur l'environnement.
- Une présentation des principales solutions de substitution examinées par le maître d'ouvrage, ainsi que les raisons de son choix au regard des incidences sur l'environnement.
- Un résumé non technique des informations mentionnées ci-dessus.

3.3. SURVEILLANCE DE LA RESSOURCE EN EAU

La Directive Cadre sur l'Eau 2000/60/CE prévoit explicitement l'obligation de contrôle, notamment l'exigence d'une autorisation préalable pour la recharge maîtrisée des aquifères, à condition que la réalisation des objectifs environnementaux fixés pour la source ou la masse d'eau souterraine concernée ne soit pas compromise. La difficulté étant souvent d'identifier l'état initial des eaux souterraines ciblées par le dispositif de recharge maîtrisée d'aquifère. Cette disposition renvoie directement à deux directives "filles" de la Directive-cadre sur l'eau :

- la Directive 2006/118/CE sur la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration ;
- et la Directive 2008/105/CE sur les normes de qualité environnementale.

Concernant la Directive 2006/118/CE, l'article 3 définit les critères pour l'évaluation de l'état chimique des eaux souterraines. Il précise qu'à des fins d'évaluation, des normes de qualité doivent être établies pour certains polluants, groupes de polluants ou indicateurs de pollution. L'article 4 de la Directive Cadre sur l'Eau 2000/60/CE rappelle les procédures d'évaluation de l'état chimique des eaux souterraines, et l'article 5 porte sur l'identification des tendances significatives et durables à la hausse de la concentration des polluants dans les masses d'eau, ainsi que sur la définition des points de départ des inversions de tendance. Cet article présente un intérêt particulier puisqu'il est nécessaire de s'assurer que l'introduction des eaux utilisées pour la recharge ne provoque pas une évolution durable des concentrations des polluants et substances présents dans les listes de surveillance dans la nappe ciblée. Les normes de qualité pour les eaux souterraines sont mentionnées dans l'annexe I, et l'annexe II présente les orientations et recommandations relatives à l'établissement des valeurs seuils par les États membres. De plus, La Directive européenne sur la production d'eau destinées à la consommation humaine (2020/2184) adoptée pour protéger la santé humaine en garantissant que l'eau destinée à la consommation soit salubre et propre, introduit de nouvelles règles pour surveiller la qualité de l'eau brutes utilisées pour la production d'eau potable et établir des exigences en matière d'hygiène pour les matériaux en contact avec l'eau potable (informations fournies dans l'Annexe I,

la liste minimale des substances à suivre pour caractériser les eaux brutes utilisées pour la production d'eau destinées à la consommation humaine et les eaux destinées à la consommation humaine *sensu stricto*).

Les objectifs environnementaux relatifs aux eaux souterraines, inscrits dans la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) et repris dans la réglementation française, figurent à la fois dans la partie législative et dans la partie réglementaire du Code de l'environnement. Les articles correspondants à ces deux parties sont détaillés ci-dessus.

Partie législative

L'article L.212-1 de la section 1, du chapitre II, du titre I du livre II du Code de l'environnement définit les objectifs de qualité et de quantité des eaux communs à chaque schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE). Ces objectifs sont les suivants :

- L'atteinte d'un bon état chimique et écologique pour les eaux de surface, à l'exception des masses d'eau artificielles ou fortement modifiées par les activités humaines.
- L'atteinte d'un bon potentiel écologique et d'un bon état chimique pour les masses d'eau de surface artificielles ou fortement modifiées par les activités humaines.
- L'atteinte d'un bon état chimique et d'un équilibre entre les prélèvements et la capacité de renouvellement pour les masses d'eau souterraines.
- La prévention de la détérioration de la qualité des eaux.

Il est également important de souligner que ces objectifs doivent être mis en relation avec les exigences législatives et réglementaires particulières applicables aux zones relevant de la protection et de la conservation des habitats ou des espèces directement dépendants de l'eau (eaux de surface ou eaux souterraines), ainsi qu'aux masses d'eau destinées à la consommation humaine, actuelle ou future. Ce dernier point implique que, dans le cadre d'un dispositif de recharge maîtrisée des aquifères, il convient de se référer également aux dispositions du Code de la santé publique, lorsque le dispositif est susceptible d'influencer une nappe utilisée ou potentiellement utilisable pour la production d'eau destinée à la consommation humaine. En cas d'incertitudes concernant les impacts potentiels sur la ressource en eau souterraine, il sera nécessaire de mettre en place un plan de surveillance visant à démontrer la non-dégradation qualitative et quantitative de la nappe, ainsi que des dispositifs d'arrêt du dispositif de recharge permettant de prévenir toute dégradation de la ressource en eau.

Partie réglementaire

Ces objectifs sont traduits en exigences réglementaires, notamment dans les articles regroupés dans les sous-sections 4 à 6 du Code de l'environnement, définissant respectivement : les critères constitutifs des schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux, les critères et caractéristiques des programmes pluriannuels de mesures, ainsi que les critères et caractéristiques des méthodologies de surveillance et d'évaluation. Ces articles sont regroupés dans la section 1, du chapitre II, du titre I du livre II de la partie réglementaire du Code de l'environnement.

Parmi ces articles, l'article R.212-9 rappelle que, afin d'assurer la protection des eaux (eaux de surface et eaux souterraines) contre la pollution, les orientations du schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux doivent prendre en compte les dispositions des arrêtés du ministre chargé de l'environnement fixant les modalités et délais de réduction progressive des rejets directs ou indirects des substances prioritaires et des substances dangereuses, dont ils dressent la liste en application de l'article L.122-1.

L'article R.212-21-1 précise que, afin de prévenir ou réduire progressivement la pollution des eaux souterraines et conformément à l'article L.212-2-1, des mesures doivent être mises en œuvre pour inverser les tendances à la dégradation de l'état des eaux souterraines, qu'elles soient avérées ou potentielles, lorsqu'elles présentent un risque significatif et durable pour la qualité des écosystèmes aquatiques ou terrestres, pour la santé humaine ou pour les utilisations légitimes de l'environnement aquatique.

En complément, l'article R.212-22 définit les critères à retenir pour la mise en place d'un programme de surveillance destiné à évaluer l'état des eaux souterraines, ainsi que les modalités de sa mise en œuvre.

Dans le cadre d'un projet de recharge maîtrisée d'aquifère, ces dispositions impliquent de pouvoir démontrer que la recharge des eaux n'a pas entraîné une augmentation durable des concentrations des substances et polluants listés dans les arrêtés définissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines[24].Étant donné que la mise en place de dispositif de recharge maîtrisée d'aquifère peut modifier également les écoulements de surface, il est nécessaire de pouvoir démontrer l'absence d'augmentation durable des concentrations des substances et polluants listés dans les arrêtés définissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux de surface[25].

Arrêtés

Plusieurs arrêtés du ministère chargé de l'environnement définissent les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux de surface et souterraines.

Pour les eaux souterraines, l'Arrêté du 17 décembre 2008 modifié, établit les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines, y compris les tendances significatives et durables de dégradation de l'état chimique, ainsi que la détermination de l'état quantitatif.

L'article 4 précise que les valeurs seuils sont fixées de manière à constater que les conditions nécessaires pour atteindre le bon état chimique d'une masse d'eau souterraine sont remplies. Il rappelle également que si les résultats de la surveillance obtenus à un point représentatif dépassent l'une de ces valeurs, cela implique qu'une ou plusieurs conditions nécessaires à l'atteinte du bon état chimique risquent de ne pas être respectées.

L'article 5 définit les normes de qualité pour les nitrates et les pesticides (Annexe I), ainsi que les valeurs seuils pour les substances prioritaires et dangereuses (Annexe II), qui doivent être surveillées pour déterminer l'état chimique d'une masse d'eau souterraine. Il rappelle que, pour une masse d'eau souterraine donnée, si ces normes de qualité peuvent empêcher d'atteindre les objectifs définis à l'article L.212-1 pour les eaux de surface associées, ou entraîner une diminution significative de la qualité écologique ou chimique, ou un dommage significatif aux écosystèmes terrestres dépendant directement de la masse d'eau, des normes plus strictes peuvent être prises par le préfet coordonnateur de bassin.

[24] Arrêté du 17 décembre 2008 établissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines et des tendances significatives et durables de dégradation de l'état chimique des eaux souterraines

[25] Arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement

Au regard de ces dispositions et des caractéristiques hydrogéologiques spécifiques d'un site de recharge maîtrisée d'aquifère, il est nécessaire d'assurer un suivi de surveillance pour les eaux souterraines, et les eaux de surface en connexion le cas échéant. Il convient également de mentionner le guide d'évaluation de l'état des eaux souterraines, publié en juillet 2019, qui détaille et explicite les procédures mentionnées dans l'Arrêté du 17 décembre 2008 modifié.

Des critères relatifs aux programmes de surveillance pour évaluer l'état chimique des eaux souterraines ont été mis à jour dans l'Arrêté du 26 avril 2022. L'article 2 et l'Annexe VIII associée définissent les substances à inclure dans les suivis de surveillance pour caractériser l'état chimique des eaux souterraines. L'Annexe VIII présente la liste socle des paramètres et substances à surveiller. Il est rappelé qu'il convient d'y ajouter les substances pour lesquelles une norme de qualité ou une valeur seuil a été fixée par l'Arrêté du 17 décembre 2008 modifié.

Les substances sont regroupées selon trois niveaux d'analyse pour le contrôle de surveillance de l'état chimique :

- Paramètres et substances faisant l'objet d'une surveillance régulière, comprenant des paramètres physico-chimiques et chimiques, ainsi que des substances appartenant à plusieurs familles d'usage selon la classification SANDRE.
- Paramètres surveillés de manière ponctuelle (analyse dite "photographique"), regroupant des substances de plusieurs familles d'usage selon la classification SANDRE.
- Paramètres surveillés à une fréquence intermédiaire, également regroupant des substances appartenant à plusieurs familles d'usage selon la classification SANDRE.

Pour les eaux de surface, l'Arrêté du 25 janvier 2010 modifié établit le programme de surveillance de l'état des eaux en application des dispositions législatives et réglementaires mentionnées ci-dessus.

L'article 11 précise que l'état chimique d'une masse d'eau de surface est considéré comme bon lorsque les concentrations en polluants ne dépassent pas les normes de qualité environnementale en tout point de la masse d'eau, hors zone de mélange. La liste des polluants et les normes correspondantes sont définies aux points 1.1 et 1.2 de l'Annexe VIII de l'Arrêté. L'article rappelle également comment ces critères doivent être utilisés pour définir l'état chimique de la masse d'eau de surface. Les modalités d'évaluation du respect des normes pour chaque polluant sont détaillées au point 1 de l'Annexe VIII, qui liste les paramètres physico-chimiques, chimiques et polluants à inclure dans la surveillance, ainsi que les normes correspondantes.

Comme pour les eaux souterraines, cet Arrêté a été modifié par l'Arrêté du 26 avril 2022. L'Annexe III de l'article 2 décrit la liste des paramètres à surveiller pour caractériser le bon état chimique des eaux de surface continentales. Ces listes constituent le socle minimal des substances à inclure dans la surveillance, pouvant être complétées par le préfet de bassin en fonction des enjeux locaux.

Ces listes constituent le socle de référence pour une majorité de projet de recharge maîtrisée des aquifères, pour les premières campagnes de mesure de la qualité des eaux de surface et souterraines sur le site de recharge, et constituent un élément clé pour l'élaboration du programme de surveillance qui sera déployé avant, pendant et après la mise en place d'un essai pilote du dispositif.

3.4. DISPOSITIONS ISSUES DU CODE DE LA SANTE PUBLIQUE

Au regard du cadre législatif et réglementaire mentionné dans le code de l'environnement et des Directives européennes mentionnés ci-dessus, il est explicitement mentionné que les dispositifs de recharge mis en place dans le cadre de la recharge maitrisée des aquifères ne doivent pas dégrader les différents usages actuels et futures des masses d'eau rechargées, notamment concernant la production d'eaux destinées à la consommation humaine (EDCH). Il est ainsi nécessaire de tenir compte du cadre législatif et réglementaire décrit dans le code de la santé publique concernant ce point.

Il est également important de rappeler qu'aucun des cadres réglementaires, ni européen ni national, n'interdit la mise en place d'une infrastructure de recharge maitrisée des aquifères dans une masse d'eau utilisée ou possiblement utilisable pour la production d'eau destinées à la consommation humaine. Le cadre législatif et réglementaire associées à la production d'eaux destinées à la consommation humaine est rappelé ci-dessous.

Partie législative

Les Articles L1321-1 à 1321-10 du chapitre I, du Titre II, du Livre III du code de la santé publique définissent le cadre législatif relatif à la production d'eaux destinées à la consommation humaine.

Concernant les critères de qualité, l'Article L. 1321-4 précise qu'une ressource en eau utilisée pour la consommation humaine doit répondre à :

- Un plan de surveillance pour l'eau faisant l'objet de cette production ou de cette distribution.
- Un contrôle sanitaire conformément aux critères définis dans les articles de la partie réglementaire et les arrêtés associés.
- L'application de toutes mesures correctives nécessaires pour assurer la qualité de l'eau, ainsi que l'information des consommateurs en cas de risques sanitaires.

Partie règlementaire

Le cadre législatif mentionné ci-dessus est transposé dans le cadre réglementaire décrit dans les Articles R. 1321-1 à R. 1321-36, de la Section 1, du Chapitre I, du Titre II, du Livre III de la partie réglementaire.

Parmi ces articles, l'Article R. 1321-2 précise que les eaux destinées à la consommation humaine doivent :

- Ne pas contenir un nombre ou une concentration de micro-organismes, de parasites ou d'autres substances constituant un danger potentiel pour la santé des personnes.
- Être conformes aux limites de qualité, portant sur des paramètres microbiologiques et chimiques, définies par arrêté du ministre chargé de la santé.

L'Article R. 1321-3 indique que les eaux destinées à la consommation humaine doivent satisfaire à des références de qualité, portant sur des paramètres microbiologiques, chimiques et radiologiques, établies à des fins de suivi des installations de production, de distribution et de conditionnement d'eau, ainsi que pour l'évaluation des risques pour la santé des personnes, et fixées par arrêté du ministre chargé de la santé.

Les Articles R. 1321-10, R. 1321-15 et R. 1321-16 définissent les modalités relatives au programme de prélèvements et d'analyses du contrôle sanitaire pour les eaux destinées à la consommation humaine. Ils mentionnent respectivement la nécessité :

- de se référer à une liste de substances à surveiller ;
- de définir des normes de qualité ;
- de définir une fréquence de suivi.

Ces critères sont détaillés dans l'Arrêté du 11 janvier 2007, modifié par l'Arrêté du 30 décembre 2022.

Arrêtés

L'Arrêté du 11 janvier 2007 modifié, précise les limites et références des eaux brutes utilisables pour la production d'EDCH, ainsi que les EDCH distribuées.

L'Article I définit les limites et références de qualité, les valeurs indicatives et les valeurs de vigilance pour les eaux destinées à la consommation humaine. Ces critères sont détaillés dans l'Annexe I. Ils sont complétés par ceux mentionnés dans l'Article 2, qui concernent les limites de qualité attendues pour les eaux brutes utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine. Ces valeurs seuils sont précisées dans l'Annexe II, laquelle liste les paramètres physico-chimiques, chimiques et les polluants devant être surveillés dans les eaux brutes destinées à la consommation humaine, ainsi que les limites de qualité correspondantes. Parmi ces polluants, plusieurs familles de substances sont mentionnées, en utilisant la nomenclature en vigueur dans référentiel SANDRE.

Il est recommandé que ces paramètres soient inclus dans le programme de surveillance mis en place avant, pendant et après la mise en service de l'infrastructure de recharge conçue dans le cadre du projet s'ils ne sont pas déjà mentionnés dans les listes de surveillance définies pour définir l'état chimique des eaux de surface ou souterraines.

3.5. RECOMMANDATIONS DE L'ANSES

En complément du cadre législatif et réglementaire fourni par le Code de l'environnement et le Code de la santé publique, des préconisations ont également été formulées par des autorités compétentes en charge de l'évaluation opérationnelle des dispositifs de recharge maîtrisée des aquifères.

Dans ce cadre, une autosaisine de l'ANSES du 6 avril 2016 (n°2012-SA-0255) a conduit à préconiser certaines recommandations liées à la recharge maîtrisée des aquifères afin de limiter les risques sanitaires (https://www.anses.fr/fr/system/files/EAUX2012SA0255Ra.pdf). Ces dernières reprennent les échanges et conclusions du groupe d'experts spécialisés « eaux » ayant travaillé sur le sujet de la recharge maîtrisée des aquifères.

L'ANSES recommande notamment que la *« recharge artificielle n'altère pas la qualité de l'eau de la nappe souterraine rechargée ni impose des traitements supplémentaires par rapport à une eau non rechargée destinée à la même utilisation et que l'eau de recharge soit de qualité équivalente ou supérieure à l'eau souterraine »*.

Malheureusement, toutes les pratiques de recharge maîtrisée des aquifères présentées en amont ne sont pas considérées dans ces recommandations car certaines d'entre elles n'ont pas été considérées par le groupe d'expert ou par l'ANSES comme des dispositifs de recharge maîtrisée des aquifères et ont été exclues du champ de l'expertise dont :

- La filtration par berges dont le but n'est pas de stocker de l'eau en aquifère.
- L'infiltration d'eaux usées traitées en sortie de stations de traitement des eaux usées (STEU) – SAT (Soil Aquifer Treatment – Epuration par le sol et le sous-sol) en l'absence d'exutoire de surface.
- Les bassins autoroutiers d'infiltration des eaux pluviales.

Dans cette saisine de l'ANSES, l'eau brute pour la recharge représente l'eau entrant dans le système de recharge artificielle dont les origines peuvent être diverses : eaux de surface, eaux usées (traitées), eaux pluviales, eaux souterraines. Elle rappelle le contexte réglementaire présenté ci-dessus, i.e. la réglementation française permet actuellement la « recharge artificielle de nappes » au cas par cas, après autorisation préfectorale en précisant que l'eau utilisée peut provenir de toute eau de surface ou eau souterraine à condition que son utilisation ne compromette pas la réalisation des objectifs environnementaux pour la masse d'eau souterraine rechargée ou augmentée. Enfin, elle souligne que d'après la règlementation, dès lors que l'eau de recharge pénètre dans le milieu souterrain, elle devient de l'eau souterraine et est donc soumis à la règlementation dédiée aux eaux souterraines.

La recommandation émise a pris les positions suivantes dans une démarche de minimisation maximale des risques :

- La recharge artificielle de nappe ne doit pas imposer après prélèvement de traitement supplémentaire pour un même usage par rapport à une ressource non rechargée.
- Toutes les eaux souterraines rechargées doivent être compatibles avec leur utilisation actuelle ou future pour l'alimentation en EDCH afin de ne pas hypothéquer l'usage de ces ressources pour l'avenir.
- La nappe, mais aussi la zone non saturée de l'aquifère, sont des compartiments à protéger, par conséquent l'eau de recharge ne doit pas entraîner une dégradation de ces derniers.
- Les abattements pouvant survenir dans ces compartiments n'ont pas été pris en compte pour formuler les recommandations sur la recharge artificielle de nappes : les contraintes portent donc sur la qualité des eaux de recharge.

Les installations de réalimentation pourront être implantées dans les périmètres de protection rapprochée ou éloignée de captage, sachant que la qualité de l'eau infiltrée ne devra pas nuire à celle prélevée sur le captage. L'arrêté de déclaration d'utilité publique devra être modifié en conséquence.

Il est alors indiqué de :

- Caractériser l'état initial de la qualité des eaux souterraines.
- Caractériser les eaux brutes devant entrer dans le système de recharge.
- Assurer un traitement approprié avant recharge afin de ne pas dégrader l'état des eaux souterraines concernées.

Quel que soit le dispositif de recharge utilisé, les eaux de recharge doivent être faiblement chargées en Matière En Suspension (MES) et en matière organique pour réduire le risque technique de colmatage du terrain. Des recommandations concernant ces caractéristiques ont été formulées, en suggérant qu'*a minima* :

- La concentration en MES soit inférieure à 10mg/l ; la turbidité soit inférieure à 5NFU et que la concentration en carbone organique total soit inférieure à 10mg/l pour les eaux de recharge dans le cas d'un système d'infiltration par bassin.
- La concentration en MES soit inférieure à 1mg/l ; la turbidité soit inférieure à 1NFU et que la concentration en carbone organique total soit inférieure à 5mg/l pour les eaux de recharge dans le cas d'un système par d'injection par forage).

Une fréquence de suivi d'une fois par mois sur la durée d'exploitation du site est recommandée ainsi qu'un suivi en continu de : la température, du pH, du potentiel redox et des concentrations en ions majeurs (et conductivité).

L'autosaisine de l'Anses étant datée de 2016, celle-ci préconise que la qualité des eaux de recharge soit au moins égale à celle des eaux souterraines natives pour les paramètres de l'annexe II de l'arrêté du 11 janvier 2007 modifié, relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des Eaux Destinées à la Consommation Humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique, et le respect des limites de qualité des eaux brutes de toute origine utilisée pour la production d'Eau Destinée à la Consommation Humaine. Il est aussi recommandé que l'Oocyste de Cryptosporidium et de kyste de Giardia soit non détecté dans les eaux.

Une qualité d'eau supérieure peut être nécessaire, en particulier pour la recharge par injection (forage).

Le suivi du site de recharge comprend également le suivi des « eaux souterraines », avec :

1) La surveillance en amont et en aval du site de recharge (piézomètres et qualitomètres) :

- Suivi en continu du niveau de la nappe : dôme piézométrique et écoulements à inondation, lessivage de polluants, surpression d'injection (rompre la couche imperméable ou rendre les forages artésiens), direction et vitesse d'écoulement.
- Suivi des paramètres du contrôle de surveillance de l'état chimique des eaux souterraines mentionnés par l'arrêté du 7 août 2015 modifiant l'Arrêté du 25 janvier 2010 établissant le programme de surveillance de l'état des eaux en application de l'article R. 212-22 du code de l'environnement et paramètres pertinents supplémentaires spécifiques au site. Une fréquence de deux fois par an (en période de hautes eaux et en période de basses eaux) est recommandée. Cette mention a un Arrêté abrogé est lié à la date de publication de l'autosaisine, datant de 2016, et n'ayant pas été réactualisé au regard de l'évolution du cadre législatif et réglementaire.

2) La surveillance des eaux prélevées après recharge : paramètres de l'annexe II de l'arrêté du 11 janvier 2007 modifié relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des Eaux Destinées à la Consommation Humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique, et le respect des limites de qualité des eaux brutes de toute origine utilisée pour la production d'EDCH. Une fréquence mensuelle sur la durée d'exploitation du site est recommandée. Cette fréquence pouvant évoluer en fonction du temps de transfert dans l'aquifère.

Il est pertinent de rappeler la position de l'ANSES (2016) dans le cadre de son autosaisine en 2012 à propos des risques sanitaires liés à la recharge artificielle des nappes souterraines. Bien que celle-ci n'ait pas de caractère réglementaire, elle peut néanmoins représenter une contrainte importante pour la mise en œuvre d'un dispositif de recharge artificielle en particulier pour un usage AEP (ANSES, 2016).

4. Mise en place d'un projet de recharge maîtrisée des aquifères et adaptation

La recharge maîtrisée des aquifères constitue une réponse stratégique aux enjeux de disponibilité et de qualité de l'eau. Cependant, **la mise en place d'un projet de recharge maîtrisée des aquifères repose avant tout sur une caractérisation précise de l'aquifère et des eaux souterraines associées, ainsi que sur une compréhension approfondie de la dynamique des écoulements au sein de l'hydrosystème concerné**.

Les études, au cœur de la démarche, se focalisent sur l'acquisition de connaissances sur le temps long qui permet d'acquérir de la connaissance sur la dynamique de l'hydrosystème (parfois pluriannuelle) dans lequel s'inscrit le système de recharge maîtrisée d'aquifère. L'investissement initial est indispensable **pour évaluer la pertinence, la faisabilité, la pérennité et l'efficacité à long terme** de la solution de recharge maîtrisée des aquifères envisagée et réaliser avec robustesse :

- **La conceptualisation et l'optimisation du système** de recharge maîtrisée d'aquifère.
- **L'anticipation, la réduction et la maîtrise des risques** (géochimiques, hydro-dynamiques, environnementaux, socio-économiques).
- **La démonstration de l'atteinte de(des) objectif(s) pour le(s)quel(s) le projet de recharge maîtrisée des aquifères a été mis en œuvre et l'attestation des bénéfices associés** (sécurisation de tous les usages, stabilisation voire augmentation des niveaux piézométriques et/ou des débits des cours d'eau, adaptation au changement climatique, maintien voire amélioration de la qualité des eaux, etc.).

Chaque **site spécifique** présente un **niveau de connaissance initial variable** : certains territoires disposent déjà d'outils de monitoring, de modélisations hydrogéologiques, d'acteurs initiés ou de projections futures (climatiques, besoins en eau, etc.), alors que d'autres partent d'un niveau de connaissance et de gestion des ressources en eau plus bas. **Cette hétérogénéité influence directement la durée des études et leur financement**, souvent pluriel (porteurs de projet, subventions, R&D, partenariats publics-privés, etc.).

La diversité des systèmes de recharge maîtrisée des aquifères associée à l'absence de cadre technique ou réglementaire unique nécessitent une approche sur mesure, adaptée à la complexité de chaque situation permettant de dégager les principaux enjeux et lever les éventuels verrous scientifiques (compréhension et représentation des écoulements et des réactions biogéochimiques, méthodes et outils d'analyse et de suivi des eaux in situ, méthodes et outils de modélisation, méthodes évaluation des risques, …). Les études, pluridisciplinaires, s'appuient initialement sur la connaissance hydrogéologique, les retours d'expérience de sites opérationnels pérennes inspirant et l'innovation (recherche et développement).

La réussite d'un projet MAR dépend également de l'implication de l'ensemble des acteurs : institutions publiques, scientifiques, gestionnaires de l'eau, agriculteurs, industriels et associations locales, etc. Les usages des eaux issues du système de recharge maîtrisée des aquifères et ceux l'environnant (alimentation en eau potable, irrigation, soutien des écosystèmes, pêche, etc.) doivent être clairement définis et identifiés dès la conception du projet. La contribution et la coopération étroite de l'ensemble des acteurs est indispensable pour partager les connaissances, co-construire les solutions, lever les verrous techniques ou socio-économiques, et assurer une gouvernance équilibrée. Les porteurs de projet jouent un rôle clé dans la coordination, alors que les partenariats pluriels (financiers, publics, scientifiques, opérationnels,

associatifs) permettent de mutualiser les ressources, de valider les choix méthodologiques et de tenir compte de la perception sociale du système sur le long terme.

4.1. LES PRINCIPALES ÉTAPES

Les différentes étapes de la mise en place d'un projet de recharge maîtrisée des aquifères ont été décrites par le gouvernement australien (Australian Government, 2009) et reprises dans le guide méthodologique de Maréchal *et al.* (2019) (lien) , dont sont issus les éléments présentés dans cette section.

Les projets de recharge maîtrisée des aquifères se distinguent des infrastructures classiques d'alimentation en eau par deux caractéristiques principales. D'une part, ils nécessitent généralement une phase préalable d'essais et d'expérimentations avant la définition du dimensionnement et du programme de mise en œuvre, incluant les études liées à l'évaluation d'impact environnemental nécessaire à l'obtention de l'autorisation préfectorale. D'autre part, ils sont fortement dépendants des conditions locales, **chaque projet étant spécifique au site considéré et répondant à des objectifs propres** (Murray, 2009) et nécessite d'étudier la faisabilité et la pertinence de cette stratégie avec l'ensemble des acteurs du territoire.

La figure 9 ci-dessous illustre les principales étapes de la mise en place d'un dispositif de recharge maîtrisée des aquifères. L'étape 1 correspond à une **étude de préfaisabilité** réalisée en bureau. Celle-ci vise à éclairer les décisionnaires quant à l'opportunité de poursuivre l'évaluation du projet de recharge. Il s'agit d'une approche qualitative conduite à partir des informations disponibles (cartographie, données spatiales et temporelles, information géologiques, données de forage, besoins en eau etc…) qui sont analysées afin d'évaluer la viabilité préliminaire du projet. Cette phase permet également d'identifier les données manquantes, qui devront être acquises lors de l'étape suivante.

L'étape 2 correspond à **l'étude de faisabilité**, suivant une approche quantitative, qui repose sur des investigations de terrain et des premiers travaux de modélisation. Celle-ci est dimensionnée à partir des enseignements de l'étude de préfaisabilité. Un important travail de caractérisation de l'aquifère, des eaux souterraines, des eaux ciblées pour la recharge et du/des usages potentiels issus du système de recharge maîtrisée d'aquifère (principal objectif) est notamment attendu à cette étape. L'étude de faisabilité a pour objectif d'évaluer la faisabilité de la solution de recharge maîtrisée des aquifères et d'en analyser les risques et les bénéfices. Des mesures préventives sont alors définies, simulées et évaluées. Les deux premières étapes aboutissent à la réalisation de rapports présentant le projet et son contexte environnemental afin d'obtenir les autorisations règlementaires et financements nécessaires à sa réalisation.

Si le niveau de risque est jugé maîtrisable, l'étape 3 consiste à la **conception, mise en place et au suivi d'un pilote expérimental** devant permettre de démontrer la viabilité technico-économique du projet. La réalisation des essais de mise en service du pilote expérimental permet d'identifier et de mettre en place les ajustements nécessaires. Après un minimum de deux années de suivi du pilote expérimental et de l'analyse des informations et données acquises lors de cette phase expérimentale, il pourrait être possible de procéder à la demande d'autorisation d'exploitation auprès de l'administration.

Enfin, l'étape 4 correspond à la **mise en exploitation** du dispositif de recharge maîtrisée d'aquifère. Elle inclut un programme de surveillance couplé à un système d'alerte ainsi qu'un programme de maintenance du dispositif d'injection. La durée prévisionnelle de réalisation de ces études est estimée à minima quatre années variant selon la connaissance initiale existante sur le territoire et son sous-sol.

La conception et la mise en œuvre d'un dispositif de recharge maitrisée des aquifères s'inscrivent dans une temporalité longue (de l'ordre de 5 à 10 ans, voire plus dans le cas de projets complexes), depuis l'identification du besoin jusqu'à la phase d'exploitation. Les différentes étapes présentées dans cette section nécessitent un temps d'acquisition et d'analyse des données incompressible. Les études préalables et de suivi ne doivent pas être considérées comme des contraintes mais comme une condition indispensable à la maîtrise des risques, à la sécurisation des investissements et à la pérennité des dispositifs de recharge maitrisée des aquifères sur le long terme.

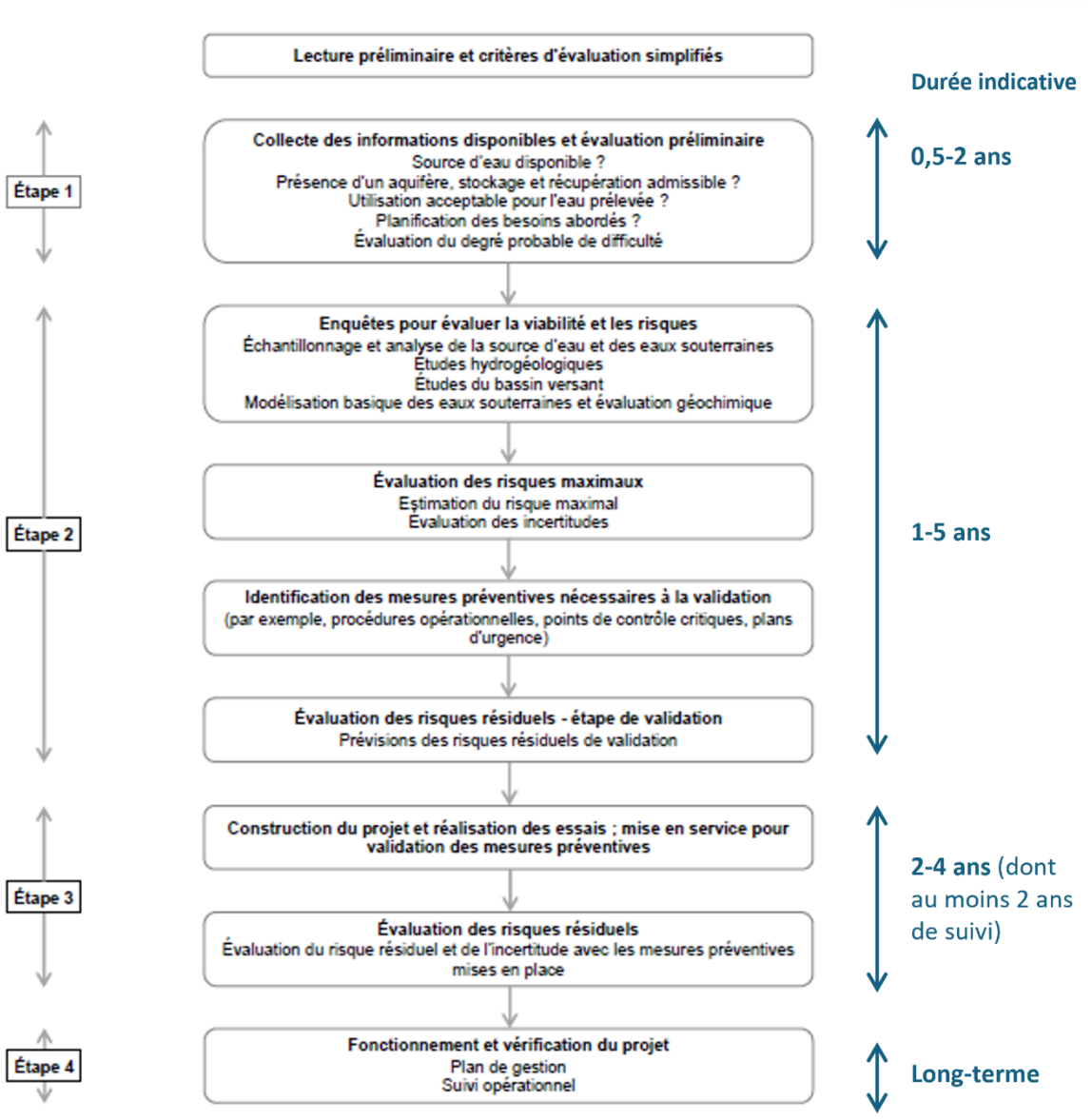


Figure 9 : Démarche d'évaluation et de gestion des risques liée à la recharge maîtrisée des aquifères (ANSES 2016, modifié de Australian Government 2009). La durée indicative de chaque étape est mentionnée à titre indicatif sur la base des retours d'expérience français et internationaux.

Dans le cadre de l'étude de préfaisabilité (étape 1), il est nécessaire de vérifier que les conditions minimales á la mise en œuvre d'un projet de recharge sont réunies. Avant d'envisager le passage

à l'étape suivante, les porteurs de projet doivent ainsi s'assurer de la présence de cinq éléments clés, qui conditionnent la faisabilité et la pertinence du projet.

Ces éléments sont examinés au travers des questions suivantes (Figure 10) :

1. La demande en eau est-elle suffisante pour justifier le projet de recharge maîtrisée d'aquifère ?
2. Une source d'eau adaptée pour la recharge maîtrisée d'aquifère est-elle disponible ?
3. L'aquifère présente-t-il des caractéristiques favorables à l'écoulement (infiltration ou injection), au « stockage » et à la récupération de l'eau ?
4. Le foncier disponible est-il suffisant et garanti pour permettre la collecte, le traitement et la recharge de l'eau ?
5. Les capacités techniques, institutionnelles et économiques nécessaires à la gestion pérenne du projet de recharge maîtrisée des aquifères sont-elles réunies ?

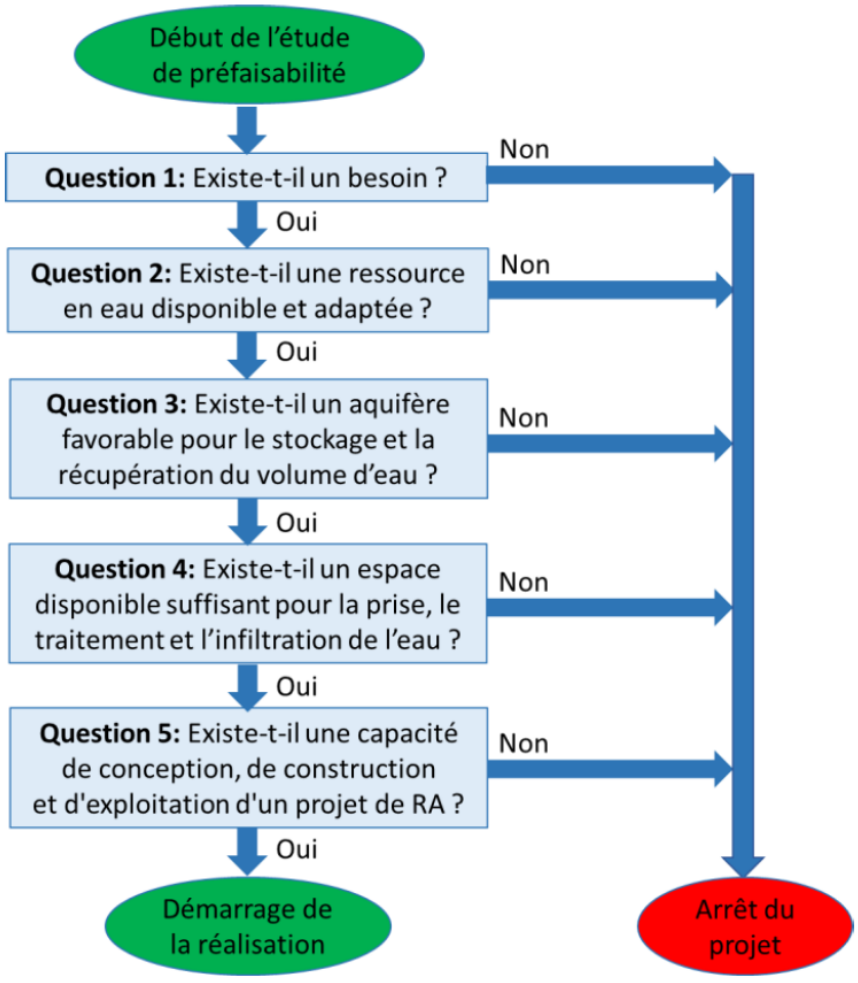


Figure 10 : Liste de contrôle des conditions nécessaires à l'engagement d'un projet de recharge maîtrisée des aquifères en phase de préfaisabilité (Maréchal et al. 2019, modifié d'après Australian Government (2009)

La question 1 correspond à l'identification du besoin et de l'objectif de la mise en place du dispositif de la recharge maîtrisée des aquifères : assurer un « stockage » supplémentaire, restaurer ou maintenir le bon état quantitatif d'une masse d'eau souterraine, soutenir le débit

d'étiage d'un cours d'eau ou restaurer le bon état qualitatif et limiter les effets de la pollution d'une masse d'eau souterraine (cf. section 2.2). La question 1 peut être abordée de deux manières : le volume d'eau récupérée après la recharge maîtrisée des aquifères devrait être suffisant pour justifier l'investissement dans le projet proposé ; si ce n'est pas le cas, il faut qu'il y ait un avantage environnemental bien précis. L'un ou l'autre de ces critères est essentiel pour un projet de recharge maîtrisée des aquifères. En matière de gestion quantitative et qualitative, dans des zones en déséquilibre ou en équilibre précaire identifiées par le SDAGE, le besoin d'un dispositif de recharge doit être mis en débat dans le cadre des PTGE en complément des actions d'économie d'eau et de rationalisation des usages (Comité de bassin Rhône Méditerranée, 2022).

La question 2 est relative à la ressource en eau qui peut être mobilisée pour alimenter le dispositif de recharge maîtrisée des aquifères. Il s'agit d'identifier les différents types d'eau et les possibles contraintes de disponibilité en quantité et en qualité au cours d'une année hydrologique. Le droit à utiliser une eau (de surface par exemple) pour la recharge doit être garanti. Dans l'idéal, le volume annuel moyen de recharge devrait être supérieur à la demande annuelle moyenne, avec un excédent suffisant pour constituer un « stockage » tampon pour répondre aux exigences de fiabilité et de qualité. Dans le cas d'un bassin versant de surface en déséquilibre quantitatif, il est peu probable qu'un droit à l'eau de surface soit disponible. La qualité de l'eau de surface doit être également vérifiée pour assurer, finalement, une ressource disponible suffisante en quantité et qualité sur une période d'infiltration donnée.

La question 3 aborde la caractérisation de l'aquifère qui est destiné à être rechargé et la nappe d'eau souterraine associée. La présence d'un aquifère approprié est essentielle à la recharge maîtrisée des aquifères. Un tel aquifère doit avoir une capacité d'infiltration adéquate et une capacité de « stockage » suffisante ; il doit aussi être capable de retenir l'eau là où elle peut être récupérée. La dynamique d'écoulement naturel de la nappe d'eau souterraine doit être considérée pour atteindre l'objectif fixé. Cette question fait appel aux paramètres hydrodynamiques de l'aquifère, à l'amplitude de variation des niveaux de nappe et donc à l'épaisseur de la zone non saturée, ainsi qu'aux vitesses et directions d'écoulement des eaux souterraines. La caractérisation minéralogique et chimique de la roche aquifère doit être examinée pour anticiper les modifications dans la qualité de l'eau dans l'aquifère.

La question 4 traite de l'espace nécessaire pour implanter un système de recharge maîtrisée des aquifères ainsi que les éléments annexes nécessaires comme le dispositif de prétraitement de l'eau (si nécessaire) et l'espace situé autour du dispositif de recharge. Les dispositifs de recharge infiltrant depuis la surface sont constitués de bassins d'infiltration ou d'étangs infiltrants tels que les milieux humides, leur emprise au sol nécessite de disposer de suffisamment d'espace adapté. Dans le cas d'une solution de recharge par injection en forage, l'espace nécessaire pour l'implantation du dispositif de recharge est moins étendu. De même, l'espace doit être disponible pour tout processus de prétraitement de l'eau utilisée pour la recharge, s'il est jugé nécessaire.

La question 5 examine la mise en œuvre d'un tel projet, de sa conception à sa réalisation et exploitation. Les aspects du dimensionnement et du coût d'un dispositif de recharge maîtrisée des aquifères sont à considérer. Le développement et la mise en exploitation d'un projet de recharge maîtrisée des aquifères pose plusieurs autres questions de gestion : quelle règlementation, quelle maitrise d'ouvrage, quelle capacité de conception, de construction et d'exploitation d'un tel projet, comment le financer ? Ces questions se posent à court terme, mais aussi à long terme dans le contexte du changement climatique.

Des connaissances et compétences en matière d'hydrogéologie, hydrologie, ingénierie, génie civil et gestion de l'eau sont essentielles pour le succès de la conception, de la construction et de l'exploitation d'un projet de système de recharge maîtrisée des aquifères. Le savoir-faire géotechnique, l'expertise dans le domaine de la conception du « stockage » et du traitement de

l'eau, de l'hydrologie, de la surveillance et de l'évaluation de la qualité de l'eau, sont également nécessaires pour certains projets. Les maîtres d'ouvrage qui ne possèdent pas ces compétences sont encouragés à se faire assister avant de procéder aux investigations de l'étape 2.

Ainsi, les cinq questions présentées ci-dessus structurent le cheminement de l'étude de préfaisabilité. Une façon de s'assurer que ces cinq points majeurs ont été correctement traités est de valider la check-list plus détaillée (Tableau 2) proposée par Murray (2009). Lorsque l'ensemble des questions de la figure 10 reçoit une réponse positive, il est alors possible d'engager un second volet d'analyse visant à identifier les données manquantes et à évaluer le niveau de difficulté du projet. Ce volet permet également d'estimer les ressources nécessaires à la réalisation de l'étape 2. Les coûts liés au lancement de l'étape 2 d'un projet de recharge maîtrisée des aquifères ne sont pas négligeables ; ils comprennent des activités telles que la réalisation de forages d'investigation, la réalisation d'essais de pompage sur les aquifères, ainsi que l'échantillonnage et l'analyse de la qualité de l'eau de la ressource prélevée et des eaux souterraines. Pour les projets ou les sites plus complexes, les études seront plus approfondies et plus coûteuses.

Tableau 2 Liste de contrôle en phase de préfaisabilité (modifié d'après Australian Government 2009)

Critère	Liste de vérification
1. Le besoin d'un projet de recharge maîtrisée des aquifères	1. Quels sont les objectifs principaux et secondaires ? (Par exemple : objectif principal : renforcer la sécurité d'approvisionnement en veillant à ce que les aquifères soient pleins avant le début de la saison sèche ; objectif secondaire : traitement de l'eau) 2. La recharge maîtrisée des aquifères est-elle la meilleure option pour atteindre l'objectif principal ? (De meilleures options pourraient être, par exemple, d'agrandir le champ captant existant, de solliciter un nouvel aquifère ou de mettre en place de meilleures mesures de conservation de l'eau). 3. La recharge maîtrisée des aquifères permettra-t-elle d'atteindre l'objectif principal ? (Par exemple, si l'aquifère est plein avant le début de la saison sèche, assurera-t-il la sécurité envisagée ?)
2. L'eau utilisée pour la recharge	1. Quel est le volume d'eau disponible pour la recharge ? 2. Quand est-il disponible ?
3. Hydrodynamique des aquifères	1. L'aquifère pourra-t-il recevoir cette eau ? a) L'aquifère dispose-t-il d'un volume suffisant pour recevoir cette eau ? (Par exemple, si vous devez stocker 1 Mm³ avant le début de la saison sèche, l'aquifère sera-t-il capable d'accueillir ce volume ?) b) L'aquifère est-il suffisamment perméable pour recevoir l'eau au débit d'alimentation prévu ? (Par exemple, si vous avez besoin de 10 puits d'injection de 10 l/s, y a-t-suffisamment de cibles de forage ou de puits existants pour permettre ces débits ?) 2. L'eau sera-t-elle récupérable quand vous en aurez besoin ? Ou s'écoulera-t-elle vers le bas en suivant la pente et s'éloignera-t-elle de la zone de captage ou d'usage prévue ?
4. Qualité de l'eau	1. La qualité de l'eau ciblée pour être utilisée comme eau de recharge est-elle adaptée ? Par exemple, l'eau n'est-elle pas trop turbide, salée ou riche en matières organiques ? Y a-t-il des paramètres particulièrement préoccupants, tels que des métaux lourds, des sous-produits de désinfection, qui pourraient affecter la qualité finale de l'eau ? 2. Décrivez la qualité naturelle des eaux souterraines. 3. Le mélange in situ par les eaux rechargées est-il susceptible d'améliorer la qualité naturelle des eaux souterraines ou de la détériorer ? Estimez les concentrations des principaux paramètres dans la qualité finale de l'eau. 4. Commentez les risques de colmatage.

5. La recharge maîtrisée des aquifères : méthode et enjeux techniques	1. Comment l'eau sera-t-elle acheminée vers l'aquifère ? 2. Quelles infrastructures seront nécessaires pour traiter, recharger et extraire l'eau ? 3. Quels sont les défis techniques et quelle est leur ampleur ?
6. Enjeux environnementaux	1. Quels sont les avantages/bénéfices, risques et contraintes environnementaux potentiels ?
7. Enjeux juridiques et réglementaires	1. Existe-t-il des contraintes juridiques ? Par exemple, l'obtention de droits sur les eaux utilisées pour la recharge, etc. 2. Existe-t-il un permis d'exploitation des eaux souterraines et quelles sont les conditions d'utilisation ? 3. Quel type d'autorisation est requis de la part des autorités pour réaliser les tests de faisabilité ?
8. Aspects économiques	1. Combien coûtera l'étude de faisabilité ? 2. Approximativement, combien coûtera le projet ? 3. Approximativement, combien coûtera 1 m³ d'eau produite à l'issue du système de recharge maitrisée et comment ce coût se compare-t-il à celui d'autres options d'approvisionnement en eau ?
9. gestion et capacités techniques	1. Quelles compétences seront nécessaires pour gérer, exploiter et entretenir le dispositif, et sont-elles disponibles ou accessibles ?
10. Aspects institutionnels	1. Qui sera responsable de l'approvisionnement en eau de recharge ? 2. Qui paiera l'eau de recharge ? 3. Qui s'assurera que sa qualité est adaptée à la recharge ? 4. Qui réglementera le projet ? 5. Qui portera le projet et son exploitation ?

4.2. ETUDES LIEES A LA PREFAISABILITE ET LA FAISABILITE

Les études de préfaisabilité et de faisabilité des dispositifs de recharge maîtrisée des aquifères visent à évaluer la pertinence, la viabilité et les conditions de mise en œuvre d'un projet et d'en évaluer les risques à l'échelle du territoire. Plus les études amonts seront complètes et robustes, plus les risques pourront être réduits et maîtrisés rendant le système de recharge maîtrisée d'aquifère durable.

L'analyse territoriale et l'identification des enjeux repose sur l'analyse des enjeux hydrologiques, hydrogéologiques, environnementaux, économiques et sociaux ainsi qu'une analyse cartographique approfondie du territoire. Ces travaux permettent d'identifier les zones favorables à la mise en œuvre de la recharge maîtrisée d'aquifère s'appuyant sur un panel d'outils pluridisciplinaires, notamment les approches spatiales multicritères sous système d'information géographique (SIG). En parallèle, une identification et une mobilisation des acteurs sont nécessaires (porteur de projet, comité de pilotage, services de l'Etat, collectivités, usagers, etc.). La recharge maitrisée des aquifères s'inscrit en effet dans un projet de territoire nécessitant une étroite concertation avec l'ensemble des parties prenantes.

A titre d'illustration, des travaux de préfaisabilité ont déjà été conduits à l'échelle du bassin Rhône-Méditerranée-Corse afin d'identifier les secteurs les plus favorables à la recharge maitrisée des aquifères (Maréchal *et al.*, 2019). Ces travaux adressent les cinq questions présentées à la figure 10 et reposent sur des analyses multicritères er des outils SIG appliqués à différentes échelles territoriales. Les outils mobilisables pour ce type d'analyse, ainsi que pour la conception et le suivi des dispositifs de recharge maitrisée des aquifères sont présentés en Annexe 3 et Annexe 4.

Acquisition de données et caractérisation du site de recharge maîtrisée d'aquifère et de son environnement : la viabilité technique et économique d'un dispositif de recharge maîtrisée d'aquifère implique un niveau de connaissance suffisant. Un important effort d'acquisition de connaissances, de données et de déploiement d'outils est attendu pour compléter les

informations existantes. L'objectif principal est l'élaboration d'un **modèle conceptuel hydrogéologique des écoulements au sein de l'hydrosystème dans lequel s'inscrit le futur système de recharge maîtrisée d'aquifère** qui est basé sur :

- La caractérisation du milieu géologique (identification lithologique, analyses granulométriques, minéralogiques, tests de lixiviation, etc.).
- La caractérisation des écoulements souterrains (cartes piézométriques en hautes et basses eaux, suivi piézométrique en quelques points clés).
- Les propriétés hydrodynamiques (pompage d'essai, essai de nappe, test d'injection ou d'infiltration couplé à un traçage, etc.).
- La qualité des eaux souterraines (échantillonnage à minima en hautes et basses eaux, pendant les pompages d'essai, essai d'injection ou essai d'infiltration).
- La caractérisation des eaux atmosphériques et de surface en lien avec les eaux souterraines (pluviométrie, évapotranspiration, ruissellement, recharge naturelle, débit des cours d'eau, échanges nappe-rivière, etc.).

De plus, la caractérisation de la qualité de l'eau utilisée pour la recharge doit faire l'objet d'un suivi complet (liste cf. DCE et plus selon spécificité locale), éventuellement en sortie de traitement des eaux, dans le but d'anticiper le colmatage du dispositif de recharge maîtrisée des aquifères et la contamination des eaux souterraines. Il s'agit par cette caractérisation d'évaluer sa variabilité temporelle et, si nécessaire, d'entreprendre ou d'ajuster *in fine* les procédés de traitement des eaux les plus appropriés. Les résultats d'analyses doivent être aussi interprétés au regard des référentiels réglementaires et sanitaires (ANSES, DCE, et normes internationales) de façon à réaliser l'évaluation environnementale (cf. 4.3).

A partir des données acquises, il convient de préciser le modèle conceptuel du dispositif de recharge maîtrisée d'aquifère vis-à-vis des risques de colmatage et du risque éventuel de contamination des eaux souterraines et des eaux superficielles le cas échéant. Quelle que soit la technique de recharge maîtrisée d'aquifère finalement sélectionnée, le colmatage est la problématique qui nécessite d'être anticipée en investissant des études de recherche préalable afin d'aboutir au fonctionnement optimal et pérenne du système de recharge maîtrisée d'aquifère. Une évaluation économique du dispositif de recharge maîtrisée d'aquifère devra également être conduite à ce stade. D'un point de vue pratique, ces évaluations reposent sur le traitement des données collectées et des travaux de modélisation de premier niveau (hydrodynamique, calculs de transport réactif). L'évaluation des risques (maximaux et résiduels) et l'identification des mesures préventives (cf. section 4.1) sont aussi une partie importante de l'étude de faisabilité (Figure 9). D'un point de vue administratif, l'étude de faisabilité doit permettre d'apporter les éléments techniques nécessaires à une demande d'autorisation d'exploitation temporaire, à partir de laquelle le pilote expérimental pourra être engagé.

Si le niveau de risque est jugé acceptable, le pilote expérimental devra ensuite démontrer que le projet de recharge maîtrisée d'aquifère répond aux objectifs de manière pérenne tout en maîtrisant au cours du temps les risques environnementaux et sanitaires. Son dimensionnement s'appuie sur les enseignements des études précédentes et notamment sur un approfondissement des travaux de modélisation de premier niveau. Les solutions techniques sont multiples (bassins, forages, puits gros diamètres, design, …), aussi, la solution la plus adaptée au projet devra être sélectionnée, notamment après avoir dressé l'état de l'art en la matière (REX international).

Une cinquième tâche sera dédiée à la construction / réception du pilote expérimental, à sa mise en service et au dimensionnement d'un programme de monitoring détaillé (points de surveillance, paramètres à suivre et fréquence d'acquisition, système de gestion des données, etc.). A partir des données collectées en conditions expérimentales (quasi réelles), des travaux de modélisation plus approfondis (niveau 3) sont à réaliser afin d'anticiper l'évolution des impacts du dispositif sur l'écoulement des eaux souterraines et de surface, la qualité des milieux et de prévenir les

phénomènes de colmatage. Une réévaluation des risques résiduels sera également réalisée, afin de valider (ou non) la robustesse des mesures préventives.

Après un minimum de deux années de suivi du pilote expérimental, il devrait être possible de procéder à la finalisation de la demande d'autorisation d'exploitation auprès de l'administration.

Durant la phase d'exploitation du système de recharge maîtrisée d'aquifère, le programme de surveillance ajusté à l'issue des études précédentes devra être opéré et couplé à un système d'alerte. Un programme de maintenance du dispositif de recharge devra également être mis en œuvre.

Pour finir, lors des études de préfaisabilité et de faisabilité du projet de recharge maîtrisée d'aquifère des ajustements de la conception du projet de recharge maîtrisée d'aquifère doivent être programmés en adéquation avec les résultats des études menées en parallèle de gestion en eau (réduction des usages de l'eau et de produits chimiques) et de modification du changement climatique. En effet, d'après l'analyse de Zheng et al. (2021), lorsque les programmes de recharge maîtrisée des aquifères ont été mis en œuvre parallèlement à une gestion de la demande, ils ont contribué de manière significative à la régénération des aquifères surexploités. Cela suggère d'importantes opportunités pour les gouvernements de faire évoluer les aquifères surexploités vers des approvisionnements en eaux souterraines plus durables en appliquant la recharge maîtrisée des aquifères pour compléter la gestion de la demande au profit des communautés locales. Via cette analyse, Zheng et al (2021) se demande alors « pourquoi les gouvernements investiraient-ils dans des systèmes de recharge maîtrisée des aquifères si les utilisateurs d'eau souterraine n'acceptent pas des plans de partage de l'eau conduisant à des systèmes durables ? Sans cela, rien ne garantirait que la recharge maîtrisée des aquifères puisse atteindre l'objectif de pérennisation des approvisionnements en eau souterraine à long terme. »

4.3. ETUDES LIEES A L'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE REGLEMENTAIRE

Les systèmes de recharge maîtrisée des aquifères sont soumis à un régime d'autorisation ou de déclaration d'après le code de l'environnement (Articles L214-1 à L214-11) et les dossiers de la demande d'autorisation préfectorale nécessitent de réaliser une étude d'impact des projets de travaux, d'ouvrages ou d'aménagements (IOTA) associés (cf. chapitre 3.2). L'étude d'impact préalable à la réalisation du projet est réalisée sous la responsabilité du ou des maîtres d'ouvrage et s'applique aux projets relevant d'un examen au cas par cas et aux projets faisant l'objet d'une évaluation environnementale systématique. La procédure à suivre pour l'étude d'impact est régie par les articles R122-1 à R122-14 du Code de l'Environnement. Les études liées à l'évaluation environnementale se focalisent principalement sur les effets directs ou induits des dispositifs de recharge maîtrisée des aquifères et de leur dangerosité concernant particulièrement :

- La modification du niveau ou du mode d'écoulement des eaux, la destruction de frayères, de zones de croissance ou d'alimentation de la faune piscicole ou des déversements, écoulements, rejets ou dépôts directs ou indirects, chroniques ou épisodiques, même non polluants.
- Les dangers et gravité des effets sur la ressource en eau et les écosystèmes aquatiques compte tenu notamment de l'existence des zones et périmètres institués pour la protection de l'eau et des milieux aquatiques.
- Les dangers pour la santé et la sécurité publique, nuisant au libre écoulement des eaux, réduisant la ressource en eau, augmentant notablement le risque d'inondation, portant gravement atteinte à la qualité ou à la diversité du milieu aquatique, notamment aux peuplements piscicoles.

Il est alors demandé d'identifier les actions de remédiation en cas de disfonctionnement du système de recharge maîtrisée des aquifères ainsi que de présenter sa compatibilité avec les dispositions du schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) ou du schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE).

Il est également possible (décret en Conseil d'Etat détermine les conditions d'application) de procéder à une procédure commune dans le cas où plusieurs demandes d'autorisation et déclaration sont relatives à des opérations connexes, ou relèvent d'une même activité, ce qui est souvent le cas des systèmes de recharge maîtrisée d'aquifère (prise d'eau et transport, dispositif de recharge, éventuels prélèvements).

Dossier d'autorisation (précisé par l'article R. 214-6 du code de l'environnement)

Le dossier d'autorisation est un ensemble d'information rappelant les éléments nécessaires à la prise de décision préfectorale concernant le système de recharge maîtrisée des aquifères. Ce dossier doit comprendre une étude d'impact et visent à formuler des recommandations afin de maîtriser les risques sanitaires liés à la recharge maîtrisée des aquifères répondant au cadre réglementaire et aux recommandations émises par les experts (Anses, 2016, cf. § 2.3.4)). Il contient principalement :

- L'emplacement de l'installation, l'ouvrage, les travaux ou l'activité (IOTA).
- La nature, la consistance, le volume et l'objet de l'ouvrage, de l'installation, des travaux ou de l'activité (IOTA) envisagés, ainsi que la ou les rubriques de la nomenclature dans lesquelles ils doivent être rangés.
- Un document :
    1. Indiquant les incidences directes et indirectes, temporaires et permanentes, du projet sur la ressource en eau, le milieu aquatique, l'écoulement, le niveau et la qualité des eaux, y compris de ruissellement, en fonction des procédés mis en œuvre, des modalités d'exécution des travaux ou de l'activité, du fonctionnement des ouvrages ou installations, de la nature, de l'origine et du volume des eaux utilisées ou affectées et compte tenu des variations saisonnières et climatiques.
    2. Comportant l'évaluation des incidences du projet sur un ou plusieurs sites Natura 2000, au regard des objectifs de conservation de ces sites (article R. 414-23).
    3. Justifiant, le cas échéant, de la compatibilité du projet avec le schéma directeur ou le schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE et SAGE) et avec les dispositions du plan de gestion des risques d'inondation mentionné à l'article L. 566-7 et de sa contribution à la réalisation des objectifs visés à l'article L. 211-1 ainsi que des objectifs de qualité des eaux prévus par l'article D. 211-10.
    4. Précisant s'il y a lieu les mesures correctives ou compensatoires envisagées.
    5. Les raisons pour lesquelles le projet a été retenu parmi les alternatives ainsi qu'un résumé non technique.
    6. Les moyens de surveillance prévus et, si l'opération présente un danger, les moyens d'intervention en cas d'incident ou d'accident.
    7. Les éléments graphiques, plans ou cartes utiles à la compréhension des pièces du dossier, notamment de celles mentionnées aux 3° et 4°.

En fonction des procédés mis en œuvre, l'identification des « incidences directes et indirectes, temporaires et permanentes » sur les écoulements et la qualité des eaux peut s'avérer plus ou moins complexe à réaliser. Dans la logique de progression par étape permettant d'assurer la pérennité des nouveaux sites de recharge maîtrisée d'aquifère, il est pertinent de réaliser cette

étude sur la base des études de préfaisabilité et faisabilité, et autant que possible d'y associer une phase expérimentale en faisant la demande d'un permis de démonstration[26] pour une période d'essai déterminée pouvant être associée à des études de recherche et développement. L'objectif étant d'appuyer la démonstration de la réalisation des objectifs suivants :

- Protection de la qualité des eaux souterraines et écosystèmes aquatiques associés.
- Qualité de l'eau récupérée après recharge adaptée à son utilisation prévue.
- Colmatage du dispositif de recharge géré efficacement.
- Débordement et inondation induit par le dispositif évité.

La démonstration de l'atteinte de ces objectifs serait à rendre sur la base d'un plan de gestion environnementale permettant de prendre en compte les impacts environnementaux et les risques associés au système de recharge maîtrisée des aquifères expérimenté, à transformer en un système opérationnel sur le long terme. Le plan comprendrait un suivi et stockage des informations et des données ainsi que les rapports appropriés pour démontrer les performances par rapport aux objectifs, des plans opérationnels et d'urgence pour gérer les risques, et des projections des performances à plus long terme. Des possibilités appropriées de commentaires de la part du public doivent être anticipées et prévues. La délivrance d'un permis d'exploitation à plus long terme, et de ses conditions, serait soumise à un examen des performances de la période de démonstration.

Point d'attention sur les incidences relatives à la qualité des eaux

L'appréciation des incidences directes et indirectes sur la qualité des eaux est, au-delà de la complexité des processus pouvant être mis en jeux, d'autant plus délicates en l'absence de valeurs seuils réglementaires applicables dans le cas de mise en œuvre de tels dispositifs en tenant compte de la diversité des dispositifs mentionnés mais aussi de la diversité et de l'hétérogénéités des formations aquifères ciblées. Il semble par conséquent indispensable de procéder selon une approche adaptée aux spécificités de chaque site. Il semble par conséquent indispensable de procéder de manière site-spécifique. En se basant sur les textes législatifs et réglementaire (cf. chapitre 3), il convient de réaliser les études dédiées et d'obtenir les résultats indiquant que le dispositif de recharge maîtrisée d'aquifère n'entrave pas les différents usages actuels et futurs des masses d'eau rechargées, notamment en ce qui concerne la production d'eaux destinées à la consommation humaine.

La qualité des eaux souterraines doit être préalablement identifiée. Il est possible de s'appuyer sur les spécifications techniques et méthodologiques normalisées dédiées à la surveillance des eaux (cf. critères, listes de polluants et substances prioritaires, normes de qualité environnementale), particulièrement celles des eaux souterraines (Guide d'évaluation de l'état des eaux souterraines, 2019)[27]. L'analyse des données de la qualité des eaux souterraines au regard des valeurs seuils recommandées en concentration pour la définition du bon état chimique et de la tendance sont de premiers éléments pertinents. Les états chimiques des eaux souterraines produits dans le cadre du rapportage à l'Europe (associé à la DCE) sont les premiers éléments sur lesquels il est intéressant de s'appuyer. Il convient également de prêter attention à la localisation et au nombre des points de mesures et d'échantillonnage, à la nature des polluants et substances suivis pour l'évaluation du bon état chimique des eaux souterraines, à la période

[26] - A titre dérogatoire, les projets soumis à évaluation environnementale systématique qui servent exclusivement ou essentiellement à la mise au point et à l'essai de nouveaux procédés ou de nouvelles méthodes, pendant une période qui ne dépasse pas deux ans, font l'objet d'une évaluation environnementale après examen au cas par cas (Article R122-2 code environnement)

[27] https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/guide_d_evaluation_etat_des_eaux_souterraines.pdf

de mesure et d'échantillonnage et au fond géochimique. De plus, afin de ne pas préempter la ressource en eau souterraine utile à la production en eau potable actuelle et future, il convient également de caractériser les eaux souterraines sous cet angle en s'appuyant sur liste minimale des substances à suivre pour caractériser les eaux brutes utilisées pour la production d'eau destinées à la consommation humaine et les eaux destinées à la consommation humaine sensu-stricto.

Le mélange de l'eau souterraine aux eaux utilisées pour la recharge dans l'aquifère doit être également étudié afin de présenter les éventuelles incidences sur la qualité des eaux issues des réactions biogéochimiques. En l'absence d'écoulement dans la zone non saturée lorsque l'eau de recharge arrive directement dans les eaux souterraines il convient de procéder aux mesures et analyses de la même manière que celle mise en œuvre pour les eaux souterraines avec cependant la nécessité de montrer que l'arrivée des eaux utilisées pour la recharge dans la nappe d'eau souterraine ne modifie pas la qualité des eaux souterraines et n'inverse pas les tendances temporelles d'évolution des concentrations de polluants. En présence d'une zone non saturée lorsque l'eau de recharge arrive indirectement dans les eaux souterraines par percolation, il est alors important d'identifier les éventuels processus biogéochimiques ayant lieu lors du passage à travers cette épaisseur d'aquifère afin d'étayer la capacité d'épuration éventuellement recherchée, ce permet d'induire une atténuation naturelle de certains polluants présents dans les eaux de recharge.

Au-delà du point de contact entre les eaux utilisées pour la recharge et les eaux souterraines en présence, les points de contrôle de la qualité des eaux devraient être identifiés et stratégiquement placés selon les sens d'écoulements préalablement identifiés, aussi bien pour permettre la comparaison avec des valeurs de référence que d'évolution des tendances des chroniques de concentrations des polluants. Ces points de contrôle et d'observation serviraient pour établir un réseau de surveillance suffisamment robuste pour tenir compte des variations saisonnières. Les résultats obtenus en ces points de contrôle présenteraient les éventuelles incidences et valideraient le programme de surveillance.

Les programmes de mesures établis dans les SDAGE et SAGE peuvent aider à prioriser les critères et tendances durables à l'amélioration recherchée. En effet ils mettent en place des stratégies visant à prévenir, à contrôler la pollution des eaux souterraines, à atteindre le bon état chimique des eaux souterraines.

L'étude des incidences ciblant la qualité des eaux doit être réalisée au regard des écoulements dont les vitesses et directions dépendent à la fois du système de recharge maîtrisée d'aquifère mais aussi de la dynamique naturelle et anthropique dans laquelle ce dernier s'inscrit. Cette dynamique d'écoulement doit être préalablement identifiée car elle est le, ou l'un, des processus clés contrôlant le devenir de la qualité des eaux souterraines. Des moyens de mesure ou d'évaluation appropriés doivent ainsi être identifiés tenant compte des écoulements et de la qualité des eaux.

L'étude d'impact doit être proportionnée à la sensibilité environnementale de la zone susceptible d'être affectée par le projet, à l'importance et à la nature des travaux, ouvrages ou interventions envisagés, ainsi qu'à leurs incidences prévisibles sur l'environnement et la santé humaine.

5. Retours d'expérience de systèmes de recharge maîtrisée des aquifères pérennes mis en place en France

La France dispose d'une longue expérience en matière de recharge maîtrisée des aquifères (Wuillemier *et al*. (2008), Casanova *et al.* (2013) et Caballero *et al.* (2018)). De nombreuses installations d'approvisionnement en eau s'appuient sur cette stratégie, mise en œuvre pour la première fois dans les années 1960 et toujours utilisée aujourd'hui. Les inventaires nationaux successifs fournis par le BRGM recensent plus de 78 installations, dont 73 % sont dédiées à la production d'eau potable dont les volumes rechargés ne font que croître (de 20 à 30 Mm³/an dans les années 1960 à 115 à 125 Mm³/an dans les années 1990).

Aucune plateforme nationale française ne référencie les systèmes de recharge maîtrisée des aquifères existants. Le retour d'expériences de recharge maîtrisée des aquifères présenté dans ce paragraphe se base sur les trois synthèses successives réalisées à l'échelle de la France par Wuillemier *et al*. (2008), Casanova *et al.* (2013) et Caballero *et al.* (2018) qui détaillent plus précisément chacun des sites brièvement présentés. Par ailleurs, l'annexe Pettenati *et al.* (2019) dans la publication de Dillon *et al.* (2019) repositionne le contexte de recharge maîtrisée des aquifères français et son évolution depuis les 60 dernières années dans un contexte international.

Ainsi sur une cinquantaine de sites de recharge maîtrisée des aquifères recensés, 50% sont en activité dont quatre systèmes historiques qui rechargent et produisent des volumes d'eau conséquents. Ces quatre sites sont : le site de Croissy-sur-Seine, le site de Flins-Aubergenville, le site de Houlle-Moulle et le site de Crépieux-Charmy (Figure 11).

La quasi-totalité des dispositifs font appel à des eaux de surface (cours d'eau) comme eau de recharge. Ces systèmes sont mis en place pour assurer une exploitation intensive dédiée à l'Alimentation en Eau Potable (AEP) et infiltrent quelques dizaines de millions de mètres cubes par an (Mm^3/an). Ces systèmes participent à l'amélioration de la qualité des nappes exploitées par traitements naturels qui s'instaurent via l'infiltration par berge et l'infiltration en alternance par bassin. Les combinaisons des systèmes de recharge maîtrisée des aquifères associés à un pré- et/ou post-traitement permettent d'atteindre la qualité requise à l'AEP tout en optimisant les procédés de traitement par les usines.

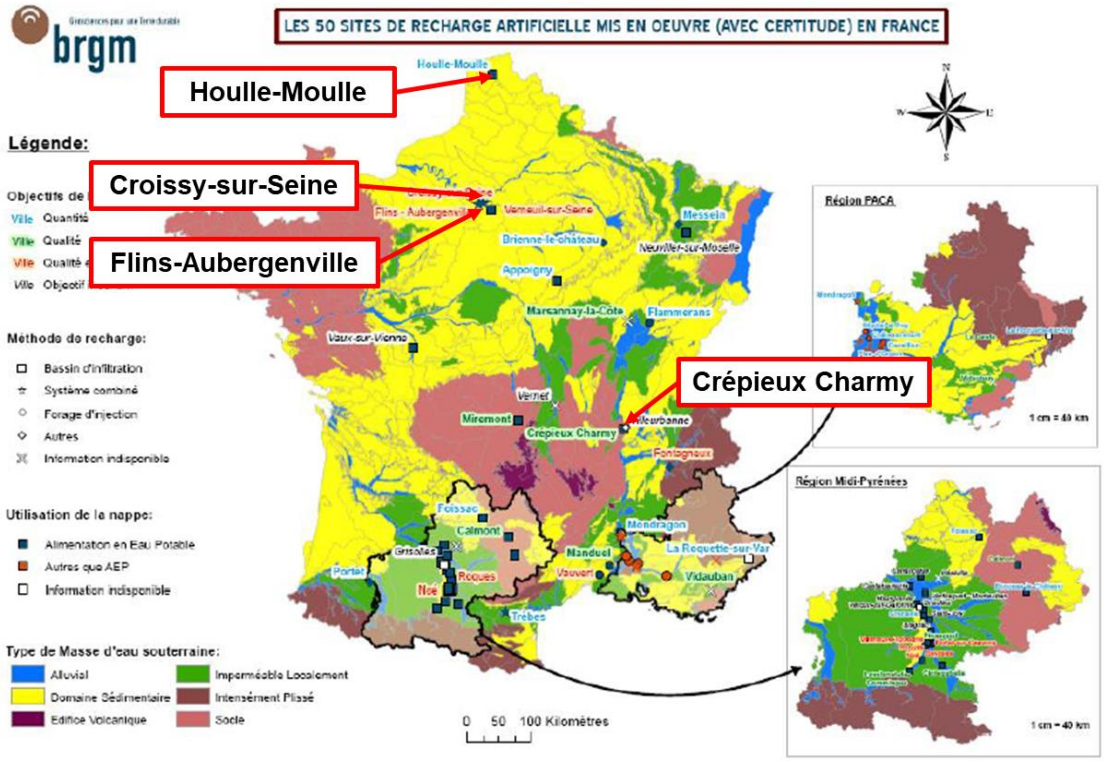


Figure 11 : Exemples de sites de recharge maîtrisée des aquifères (MAR) inventoriés en France (Wuilleumier et al, 2008 ; Casanova et al., 2013 ; Caballero et al., 2018)

D'autres systèmes de recharge maîtrisée des aquifères ont été mis en place afin de combiner les effets bénéfiques naturels des MAR. C'est le cas du système SAT (Soil Aquifer Treatment : épuration par le sol et l'aquifère) côtier d'Agon-Coutainville (opéré par SAUR) mis en service en 2005 pour bénéficier du traitement complémentaire à la STEP et garantir la qualité des eaux côtières où s'exerce une exploitation conchylicole importante, un lieu de loisir touristique et une zone Natura 2000 à préserver (Guillemoto, 2022; Guillemoto *et al.*, 2023, 2022). Une référence SAT est le système israélien de Shafdan situé au sud de Tel Aviv dont les eaux usées sont traitées et infiltrées par bassins avant d'être exploitée pour l'irrigation. La station de Shafdan traite environ 135 millions de mètres cubes d'eaux usées par an et est en opération depuis plus de 40 ans (Negev *et al.*, 2017). Les eaux usées sont traitées jusqu'à obtenir des effluents de niveau secondaire à l'aide d'une station d'épuration mécanique et biologique (MBTP), avant d'être infiltrées dans les bassins SAT (Negev *et al.*, 2017). Le système SAT comprend 6 bassins d'infiltration qui sont inondés/mis en eau en alternance. Le schéma opérationnel comprend 1-2 jours d'inondation et 2-6 jours de recharge en eau, se terminant par au moins 24h de séchage du bassin (Goren *et al.*, 2014). Les bassins ont été construits dans des dunes au-dessus de l'aquifère de la plaine côtière d'Israël, qui, dans cette région, sert de zone de stockage pour les effluents traités. L'effluent est récupéré par une série de puits de production situés à 200-1000 m de chaque bassin d'infiltration et utilisé pour l'irrigation des champs au sud d'Israel. La qualité de l'effluent après le SAT est considérablement améliorée et est approuvé par le ministère israélien de la Santé pour une irrigation sans restriction (Goren *et al.*, 2014).

Dans le recensement des systèmes de recharge maîtrisée des aquifères en France, peu de dispositifs utilisent le type d'injection par forage (ASR/ASTR) pour stocker et reprendre les volumes de façon différée dans le temps. Cependant, à Vauvert (opéré par SAUR) un système de recharge maîtrisée des aquifères par injection est mis en service vers 1985 pour assurer une exploitation AEP tout en améliorant la qualité de la nappe de la Vistrenque. De nombreux retours

d'expérience de recharge directe par forage (ASR et ASTR) proviennent des Etats Unis d'Amérique (Pyne, 2005) et d'Australie (Dillon and Pavelic,1996 ; Russell and Dillon, 2002 ; Dillon, 2020) aux capacités de recharge variées allant de 40 à 2800 ML/an. Les aquifères recevant les volumes d'eau rechargés sont des aquifères très transmissifs de 100 m^2/j à 10 000 m^2/j dans des aquifères fracturés ou poreux (Ringleb *et al.*, 2016).

Au cours des 15 dernières années, les effets du changement climatique se sont déjà fait sentir en France, avec une augmentation des épisodes de sécheresse (en fréquence et en intensité). Depuis 2010, un nombre croissant de ressources en eau ont atteint les statuts alarmants d'« alerte renforcée » et de « crise », notamment en 2017, 2019, 2022, 2023, 2024 et encore aujourd'hui en 2026 (cf. 1.1). Ces années consécutives de sécheresse et d'accès restreint aux ressources en eau mettent en lumière les enjeux liés à la gestion de l'eau et particulièrement les crises. De nombreuses alternatives sont étudiées, notamment la stratégie de recharge maîtrisée des aquifères. D'ailleurs, au cours des cinq dernières années, d'après les informations connues du BRGM, plus d'une dizaine d'études d'envergures se sont focalisées sur la faisabilité de nouveaux systèmes de recharge maîtrisée des aquifères, sur des expérimentations à grandes échelles ou sur l'optimisation de systèmes existants. Ces études et réflexions sont menées sur le territoire français que ce soit pour sécuriser l'eau potable, les usages industriels et agricoles, où encore pour réduire les impacts d'inondation ou de pollution. Citons par exemple les études de cartographie de faisabilité de recharge maîtrisée des aquifères (dont infiltration) sur la région Rhône Méditerranée Corse, sur le département Indre-et-Loire, sur la métropole de Rennes et la métropole de Bordeaux, les Pyrénées orientales, mais aussi des études locales et des pilotes démonstrateurs comme sur le bassin de la Garonne (R'Garonne à Toulouse, Rammage), la métropole de Bordeaux, la ville de Dijon, l'île de Ré ou le sud de la Martinique, et pour finir, des études et expérimentations pour optimiser ou développer les systèmes existants comme à Croissy-sur-Seine, à Agon-Coutainville ou sur la plaine du Roussillon. Ces s'études s'appuient sur i) des analyses de données et des analyses multicritères spatiales, ii) des modèles hydrogéologiques et des simulations de scénarios, et iii) des projets pilotes à différentes échelles.

Plus que jamais, la coordination, le partage des connaissances, la prise en compte des expériences passées, l'implication des parties prenantes et la formation prennent tout leur sens pour rendre efficaces et pérennes ces nouveaux projets de recharge maîtrisée d'aquifères.

5.1. CROISSY-SUR-SEINE- LE PECQ (YVELINES)

Le site de recharge artificielle de Croissy-Sur-Seine est le plus grand et le premier à avoir été mis en service en France (en 1959) afin de maintenir l'exploitation intensive et la qualité de la nappe de la craie dans la boucle de Croissy pour l'alimentation en eau potable.

La description ci-dessous provient de Detay (1997), Wuilleumier *et al.* (2008) et Casanova *et al.* (2013).

Objectifs de la recharge maîtrisée des aquifères

La recharge maîtrisée de la nappe phréatique du « Pecq-Croissy » (Figure 12) a pour objectif principal d'améliorer la qualité de l'eau pompée tout en permettant la reconstitution des réserves en eau souterraines. Cette nappe étant fortement exploitée par un important champ captant (45 forages d'environ 30 m de profondeur), il est nécessaire de soutenir son niveau et d'en garantir la pérennité. Par ailleurs, cette technique s'inscrit dans une logique de gestion durable de la ressource en eau, en permettant de réguler les volumes disponibles grâce à une utilisation combinée des eaux de surface et des eaux souterraines. Elle contribue aussi à limiter l'impact

des pollutions issues de la Seine sur la nappe et participe à la régularisation thermique de celle-ci.

Caractéristiques de l'aquifère et de la nappe

La nappe exploitée est une nappe alluviale libre, naturellement alimentée par les précipitations ainsi que par les échanges avec la Seine, avec laquelle elle est en lien hydraulique direct. L'aquifère présente une structure bicouche : il est constitué en surface d'alluvions composées de sables et de graviers très perméables, dont l'épaisseur varie entre 5 et 15 mètres, reposant sur une formation de craie fissurée plus profonde et beaucoup moins perméable, qui constitue le substratum. Cette configuration favorise les échanges rapides entre les eaux de surface et la nappe, mais la rend également particulièrement vulnérables aux pollutions. En effet, les eaux de la Seine, qui peuvent contenir des rejets urbains et industriels, sont susceptibles de transférer vers la nappe des composés azotés, des matières organiques ainsi que des éléments comme le fer et le manganèse.

Description du système mis en place

Le dispositif de recharge artificielle repose sur l'infiltration de l'eau de Seine après un traitement préalable afin d'en améliorer la qualité. Dans un premier temps, l'eau de la Seine est pompée puis subit une série de traitements (Figure 13 et 13). Elle est d'abord filtrée mécaniquement à l'aide de grilles et de tamis, puis traitée par coagulation grâce à l'ajout de réactifs tels que du charbon actif, un coagulant et un polymère. L'eau transite ensuite jusqu'à des bassins de décantation dans lesquels un coagulant et un floculant sont injectés afin de 'optimiser la sédimentation des particules. La dernière étape est une filtration sur sable. Par ailleurs, la qualité de l'eau prélevée est surveillée notamment en ce qui concerne la présence d'hydrocarbures afin d'éviter tout prélèvement en cas de pollution.

Une fois traitée, l'eau est acheminée vers un ensemble de dix bassins d'infiltration couvrant une surface d'environ 12 hectares. Elle s'infiltre progressivement dans le sol a une vitesse d'environ 1 m/jour, jusqu'à atteindre la nappe située une quinzaine de mètres en profondeur. Ce système permet d'infiltrer chaque année entre 25 et plus de 30 millions de m^3 d'eau pour des prélèvements totaux de l'ordre de 45 à 52 millions de m^3. Finalement, la dernière étape est le prélèvement par pompage d'un mélange d'eau de la Seine prétraitée-infiltrée avec de l'eau de Seine infiltrée par filtration par berges et avec de l'eau de la nappe de la craie. Le dispositif mis en service en 1959, a connu des évolutions, notamment avec un test des injections directes par puits en 1974. Toutefois, cette technique a été abandonnée en raison des difficultés d'exploitation, en particulier liée au colmatage.

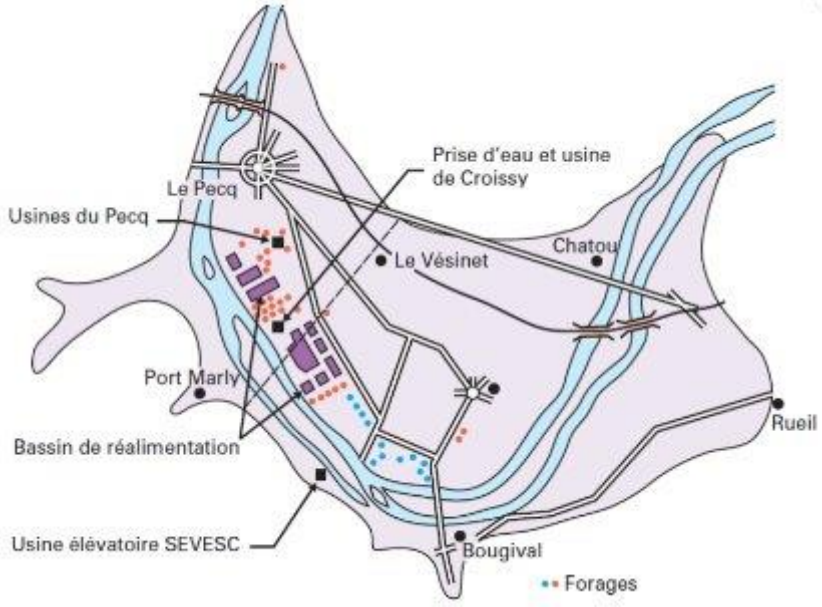


Figure 12 : Schéma de la nappe de Croissy, indiquant les bassins de réalimentation et les forages de « repompage » (SUEZ ©).

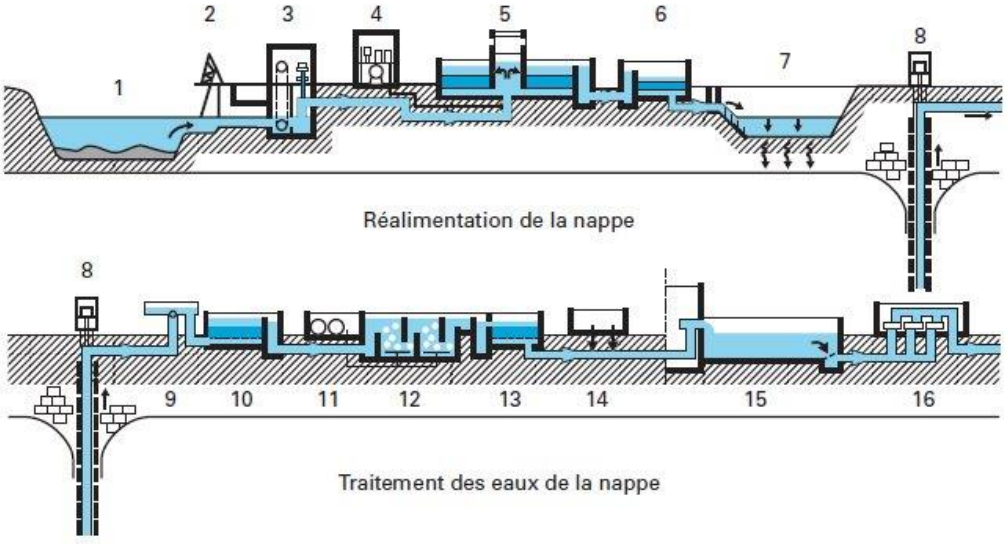


Figure 13 : Schémas de l'installation de réalimentation de Croissy (débit : 136 800 m3/j) et de l'affinage des eaux de la nappe (usine du Pecq- débit :146 400 m3/j) (SUEZ ©)

5.2. FLINS-AUBERGENVILLE (YVELINES)

Objectif de la recharge maîtrisée des aquifères. Le site de Flins Aubergenville, dans les Yvelines, utilise depuis 1980 un système de recharge artificielle de la nappe phréatique afin d'améliorer la qualité de l'eau extraite tout en préservant le niveau piézométrique de l'aquifère. La nappe libre exploitée, située le long de la Seine sur environ 8 km, constitue une source importante d'eau potable pour près de 500 000 habitants des Yvelines et des Hauts-de-Seine (SUEZ, 2021).

Caractéristiques de l'aquifère et de la nappe. Cette nappe est naturellement alimentée par les précipitations et, selon les périodes de l'année, par la Seine avec laquelle elle est en continuité hydraulique. En conséquence, la nappe peut contenir certains polluants, tels que des composés azotés provenant de la dégradation de la matière organique présente dans les sédiments du fleuve, ainsi que du fer et du manganèse. La nappe se situe dans un aquifère constitué de deux couches : les alluvions de la Seine et le toit fissuré de la craie sénonienne sous-jacente. Les alluvions sont composées de sable et de graviers très perméables, avec une épaisseur comprise entre 5 et 15 mètres. En revanche, la partie inférieure de la craie, située entre 30 et 40 mètres de profondeur, présente une faible perméabilité et forme ainsi la base imperméable de l'aquifère. Dans un territoire marqué par des activités industrielles et agricoles, la gestion de la qualité de l'eau est particulièrement surveillée pour prévenir les pollutions diffuses ou accidentelles.

Description du système mis en place. A l'origine, le dispositif consistait à infiltrer dans des bassins l'eau de la Seine après un pré-traitement léger. L'eau était d'abord chlorée, puis acheminée vers une usine de traitement ou elle subissait une décantation avec ajout de coagulants et de polymères, avant qu'une étape de filtration ne soit ajoutée en 1994. Cependant le colmatage progressif des bassins d'infiltration a conduit à repenser le système (ANSES, 2016).

A partir de 2004-2005, le dispositif a été modernisé grâce aux procédés Bi'Eau et Geofiltration © Suez, qui reposent sur l'utilisation des capacités naturelles de filtration des sols. Le dispositif comprend trois étapes. Des forages primaires implantés le long de la Seine crée une différence de pression dans la nappe afin de favoriser l'infiltration de l'eau de la Seine par les berges, ce qui constitue une première filtration naturelle. Elle est ensuite acheminée vers des bassins d'infiltration, aménagés dans d'anciennes sablières, ou elle s'infiltre progressivement dans l'aquifère (environ 0.4 à 1 m par jour) en bénéficiant d'une nouvelle filtration naturelle (Wuilleumier *et al.*, 2008; SUEZ, 2021). Les cycles alternes d'alimentation et d'assec permettent de limiter le colmatage et d'assurer cette seconde étape de filtration par les sols. Enfin, l'eau est récupérée par des forages secondaires situes à proximité des bassins et acheminée vers l'usine de production d'eau potable (ANSES, 2016).

Ce système permet une gestion à la fois quantitative et qualitative de la ressource :

- Il stabilise et augmente le stockage d'eau souterraine.
- Il améliore la qualité de l'eau produite, qui contient de faibles concentrations en nitrates, fer, manganèse et ammonium.
- Il sécurise la ressource en limitant les impacts de pollutions accidentelles.

Le procédé fonctionne sans usine de traitement ni produits chimiques, ce qui réduit aussi les sous-produits de traitement (environ 1000 tonnes de boues évitées par an). Chaque année, environ 8 millions de m3 d'eau sont ainsi infiltrés dans la nappe (Casanova *et al.*, 2013). Le fonctionnement hydrodynamique du procédé Bi'Eau est présenté en Figure 14 (Wuilleumier *et al.*, 2008)

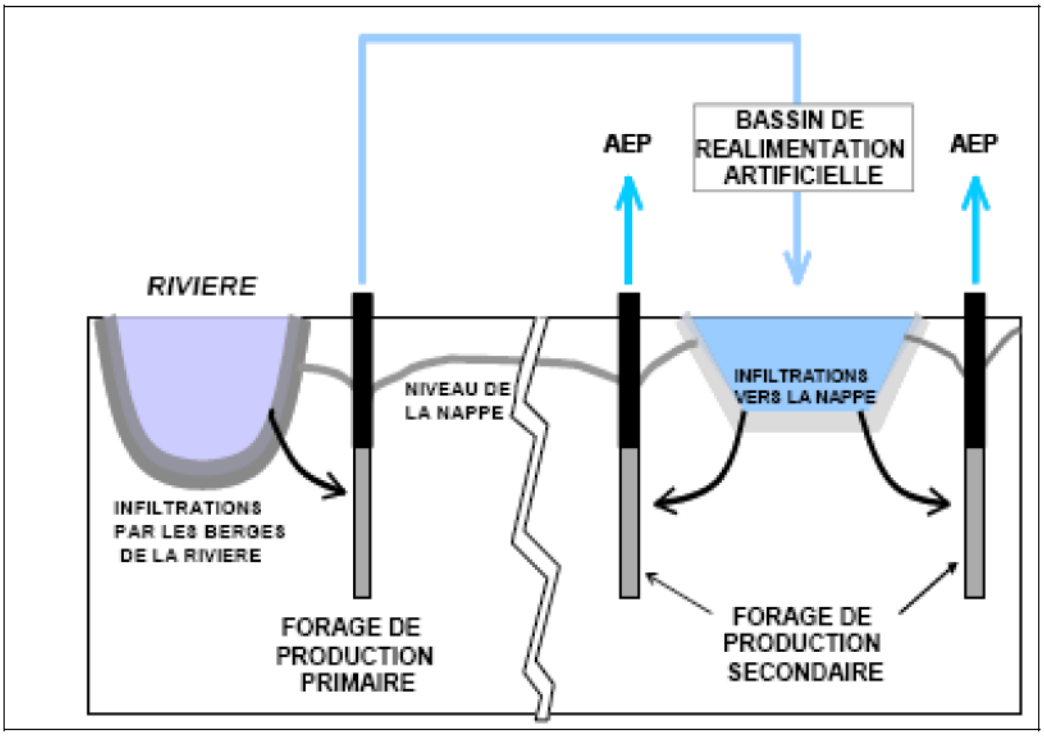


Figure 14 : Fonctionnement hydrodynamique du procédé Bi'Eau (Wuilleumier et al., 2008)

5.3. AGON-COUTAINVILLE (NORMANDIE)

Le système SAT (Soil Aquifer Treatment) d'Agon-Coutainville est situé en Normandie, entre la pointe de la Hague et la baie du Mont Saint Michel. La commune est l'une des plus anciennes stations balnéaires du département de la Manche et la plus grande zone conchylicole (en termes de production et stockage) de France. Le secteur connait aussi une pression démographique en période estivale.

La description ci-dessous provient de Guillemoto (2022) et Picot-Colbeaux et al. (2021) et les documents et résultats produits dans le cadre de deux projets de recherche européens (AQUANES -H2020 et EVIBAN - JPI Water).

Objectif de la recharge maîtrisée des aquifères

Le dispositif de SAT a été mis en place afin d'éviter le rejet direct des eaux usées traitées secondaires (STWW) dans les eaux de surface côtières, dans le but de préserver les activités économiques de littoral, telles que la conchyliculture, le tourisme et les zones naturelles protégées. Pour répondre à cet objectif, il repose sur un système maitrisé de bassins d'infiltration fonctionnant en alternance. (Guillemoto, 2022). Ce procédé permet un traitement complémentaire naturel lors du passage de l'eau dans le sol et l'aquifère. Par ailleurs, le SAT contribue à limiter l'intrusion du biseau salé dans la nappe côtière pouvant renforcer la disponibilité en eau douce, notamment pour les usages d'arrosage.

Caractéristiques de l'aquifère et de la nappe

Le SAT a été mis en place dans l'aquifère dunaire constitué de sables éoliens du Quaternaire et des ables dunaires récents. L'aquifère a une transmissivité élevée (0.0016-0.003 m^2/s) car il est constitué de limon grossier (15%), de sable fin (9%) et de sable grossier (51%) et s'enrichit de fragments de coquillages avec la profondeur (Guillemoto *et al.*, 2022).

Description du système mis en place

Le système est mis en œuvre depuis 2005 dans sa forme actuelle et est intégré de manière durable au réseau municipal de traitement des eaux usées. Le système SAT comprend les bassins d'infiltration et l'aquifère jusqu'aux exutoires naturels de la nappe : les cours d'eau et la mer. Le système SAT a été mis en œuvre il y a plus de 20 ans en complément du traitement biologique à boues activées, de la station de traitement des eaux usées dimensionnée pour 35 300 équivalents-habitants. Les eaux usées traitées sont acheminées de façon gravitaire dans le SAT et s'infiltrent via trois bassins d'infiltration d'une surface totale de 29 000 m² pour atteindre un aquifère dunaire (Figure 15). Les bassins d'infiltration sont mis en eau pendant 4 mois consécutifs de façon alternée puis laissés au repos le reste de l'année selon un calendrier prévisionnel suivi par l'opérateur (Guillemoto, 2022). La quantité d'eau recharge est d'environ 2 000 m^3/jour (500 à 5 000 m^3/jour et plus). Un golf, situé sur l'aquifère dunaire à proximité des bassins d'infiltration utilise l'eau infiltrée en période estivale pour ses besoins d'arrosage. Des piézomètres situés à proximité des bassins d'infiltration, en aval et en amont des rejets, permettent d'accéder à l'eau souterraine

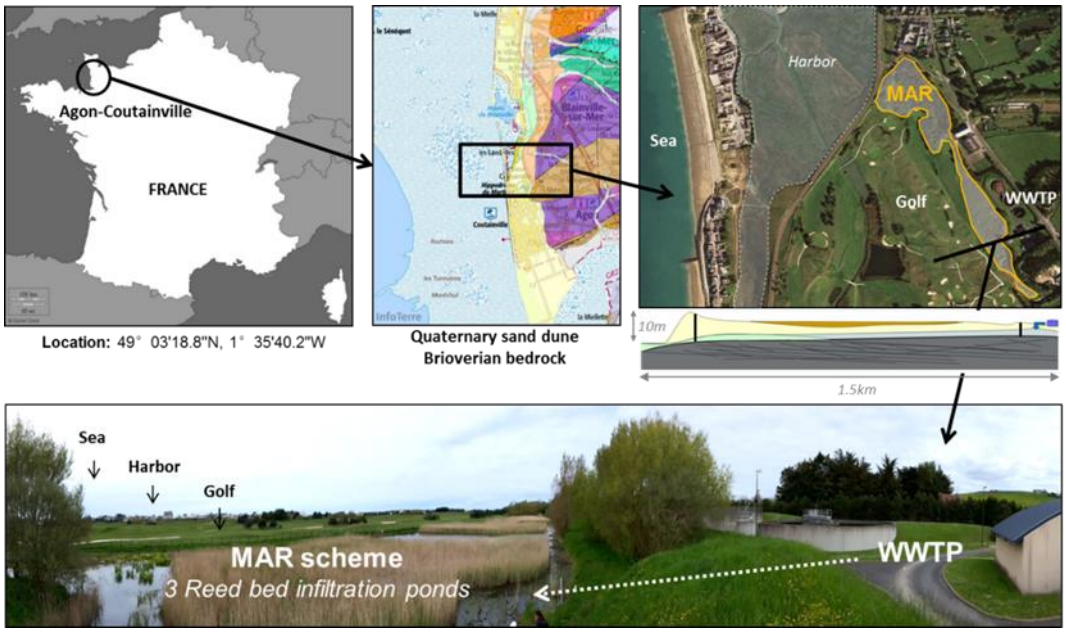


Figure 15 : Présentation du site SAT de Agon-Coutainville (Picot-Colbeaux et al., 2021)

5.4. HYÈRES LES PALMIERS (VAR) - DISPOSITIF AQUA RENOVA

Le dispositif AQUA Renova, mis en service en 2015 se distingue par son caractère récent par rapport aux autres dispositifs présentés dans cette section. Il est déployé conjointement avec une gestion spécifique des champs captants AEP fondée sur la méthode des gradients, permettant de maintenir une barrière hydraulique et ainsi prévenir l'intrusion saline (mise en place par SUEZ pour la ville, des compléments d'informations sont également abordés dans les documents et résultats issu du projet de recherche européen SMART-CONTROL – JPI Water[28]).

Objectif de la recharge maîtrisée des aquifères

L'objectif principal est de restaurer la nappe phréatique du Bas Gapeau afin de sécuriser l'approvisionnement en eau potable et réduire la dépendance aux ressources extérieures. La nappe constitue la principale ressource en eau potable de la ville d'Hyères. Face à la surexploitation et aux intrusions d'eau salée, le projet vise à maintenir un niveau d'eau suffisant pour repousser le biseau salé issu de la mer très proche. Il cherche également à améliorer l'autonomie en eau du territoire, notamment en période estivale où la demande augmente fortement (SUEZ, 2021).

Caractéristiques de l'aquifère et de la nappe

La nappe alluviale du Bas Gapeau est située en zone littorale et est particulièrement vulnérable aux intrusions marines. Lorsque son niveau baisse sous celui de la mer, l'eau salée pénètre dans l'aquifère, dégradant la qualité de la ressource. Cette situation a été aggravée par une forte pression sur la ressource, liée à la croissance saisonnière de ma population et aux épisodes de déficit hydrique. L'intrusion saline a pu atteindre jusqu'à 2 km à l'intérieur des terres, entrainant une réduction des prélèvements et une baisse de la capacité de production en eau potable.

Description du système mis en place

Le projet repose sur deux actions complémentaires 1) la gestion des prélèvements, afin de maintenir la nappe au-dessus du niveau marin et limiter les intrusions salines ; 2) la recharge artificielle de la nappe, avec la mise en place deux bassins d'infiltration de 400 et 600 m² alimentés par un petit fleuve local (Le Roubaud). Il permet de remonter le niveau de la nappe entre la mer et les ouvrages de captage en accroissant le stock d'eau douce en période hivernale (Figure 16). Un dispositif de surveillance étendu permet le suivi des niveaux d'eau et de la conductivité et de contrôler la position du biseau salé. Le volume d'eau injecté, de l'ordre de 300 000 m^3/j durant l'hiver, entre les mois de novembre et d'avril, permet de maintenir le niveau de la nappe à environ + 1 m NGF au niveau des forages exploités et de maintenir les eaux salées à distance en ajustant les volumes prélevés (Lyonnaise des Eaux, 2012; SUEZ, 2021; Comité de bassin Rhône Méditerranée, 2022).

Le préfet du Var ayant autorisé le projet au titre de la Loi sur l'Eau en juin 2014, les travaux ont été entrepris à partir de juillet 2014 (Aussibal *et al.*, 2016) Un dossier CNPN (Conseil National de la Protection de la Nature) a été déposé en complément du dossier Loi sur l'Eau au vu de l'identification d'une espèce protégée, *Phalaris Aquatica*, présente sur la parcelle pressentie pour accueillir le bassin d'infiltration (Lyonnaise des Eaux, 2013). Le système est opérationnel depuis novembre 2015 et le projet Aqua Renova a permis à Hyères de retrouver 97 % d'autonomie en eau un an après le terme des travaux (Aussibal *et al.*, 2016b; SUEZ, 2021).

[28] Case study 3: Aquarenova, France – SMART-Control

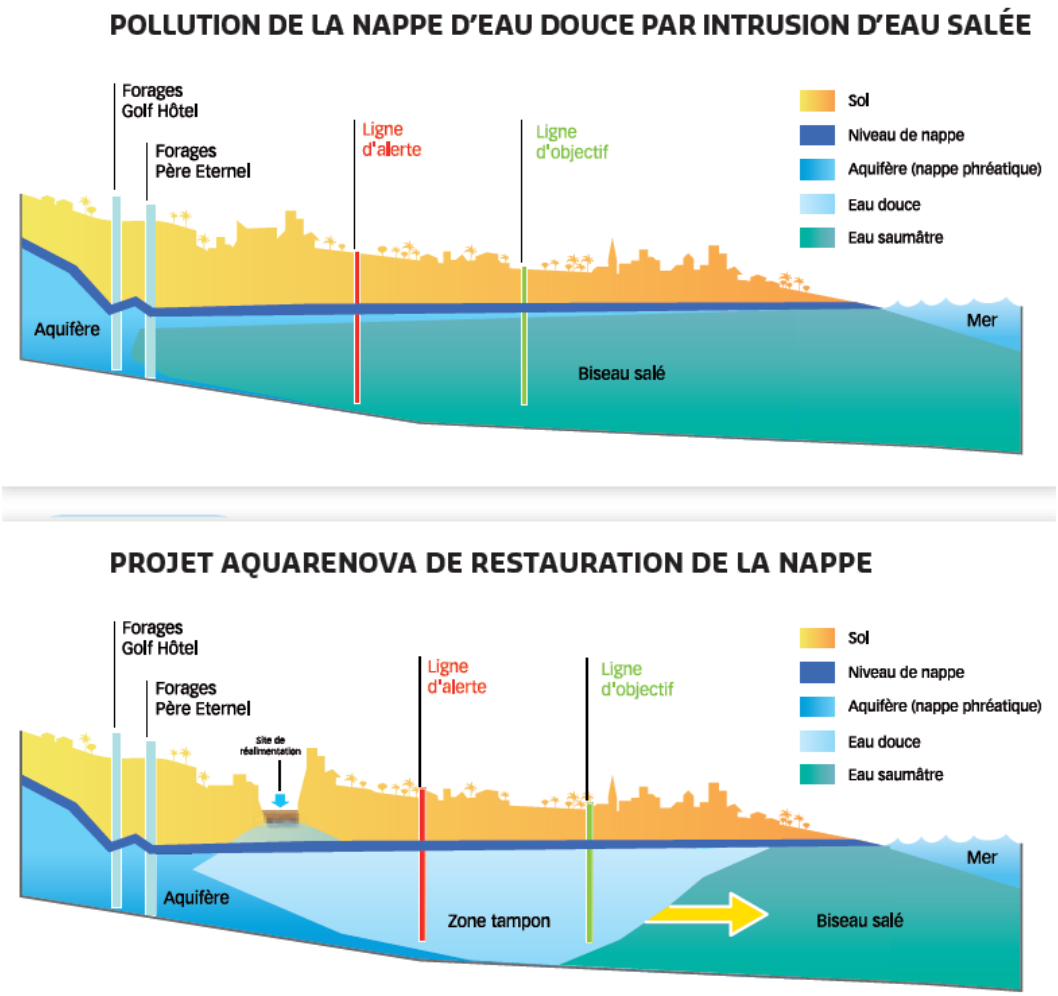


Figure 16 : Schéma de la nappe du bas Gapeau avant et après la mise en place du dispositif de recharge maitrisée indirecte (Lyonnaise des Eaux, 2014)

6. Questionnements sur les leviers, contraintes et perspectives liés à la recharge maîtrisée des aquifères

Ce présent chapitre propose de mettre en lumière les leviers, freins, contraintes et perspectives liés à la mise en œuvre des solutions de recharge maîtrisée des aquifères en France. Plusieurs points sont identifiés dont certains sont approfondis ci-après (cf. Annexe 5) et peuvent se résumer à :

- L'adoption d'une définition opérationnelle de la recharge maîtrisée des aquifères au niveau national et européen offrirait une opportunité d'harmonisation des pratiques. Cela permettrait de clarifier les attentes pour les porteurs de projet et le cadre pour les personnes instruisant les dossiers. Cela faciliterait aussi l'intégration de ces opérations dans les documents de planification et de gestion des ressources en eau.

- La mise en cohérence du cadre réglementaire de la recharge maîtrisée des aquifères apparait particulièrement importante dans des situations complexes ou lorsque l'aspect réglementaire est difficile à interpréter, notamment vis-à-vis de la filtration et l'épuration complémentaire par l'aquifère surtout via la zone non saturée de l'aquifère. Une telle démarche permettrait de développer une réflexion globale sur l'économie circulaire et de favoriser la mise en œuvre des systèmes optimisant les coûts financiers et énergétiques, limitant la production de déchets, et en maximisant les bénéfices spécifiquement ceux concernant la protection des eaux souterraines et des écosystèmes aquatiques associés. La synergie entre les systèmes de recharge maîtrisée des aquifères et les dispositifs de réutilisation directe des eaux usées traitées (sans passage par l'environnement naturel) pourrait être renforcée.

- Une meilleure articulation entre l'encadrement règlementaire des prélèvements d'eau souterraine et celui de la recharge maîtrisée des aquifères permettrait de renforcer la cohérence globale des projets et fiabiliserait le système de recharge maîtrisée des aquifères. En effet, les opérations de recharge maîtrisée des aquifères et les prélèvements associés sont aujourd'hui souvent appréhendés selon des cadres distincts alors qu'ils participent d'un même système hydrogéologique. Une approche intégrée des deux processus par un encadrement spécifique garantirait des prélèvements compatibles avec la recharge initialement dimensionnée et par conséquence le maintien du temps de résidence des eaux dans l'aquifère requis ce qui limiterait les risques induits sur la qualité des eaux.

- La mise en œuvre d'une base de données nationale dédiée aux systèmes de recharge maîtrisée des aquifères expérimentaux et opérationnels apporterait une connaissance plus fine utile à la surveillance des eaux souterraines, à la gestion des ressources en eau et à la conception de nouveau projet de système de recharge maîtrisée des aquifères. L'adéquation des informations et données ciblées par la base de données avec un système de gestion des données et un bilan annuel rapportant le fonctionnement du système gagnerait en efficacité.

- Le soutien de l'innovation, la recherche et le développement appliqué au système de recharge maîtrisée des aquifères et associé à sa mise en œuvre facilite l'évaluation de l'impact environnemental et le suivi de la qualité des eaux qui constituent des éléments clés tant dans leur conception que dans leur surveillance, et par conséquent dans la

décision de leur mise en œuvre. Les techniques de mesures et d'analyses des eaux ainsi que les méthodes de caractérisation de l'état initial des milieux aquatiques et de leur suivi sur le long terme (surveillance et contrôle) représentent un enjeu majeur qui doivent être améliorées et optimisées de manière fiable pour ne pas peser sur le modèle économique lié entre autre aux capteurs performants et monitoring en temps réel, au nombre d'échantillons d'eaux et d'analyses, aux méthodes et précisions des analyses, au nombre d'éléments et de composés chimiques et biologiques à analyser, etc.

- L'examen via l'approche des sciences humaines et sociales (SHS) de la perception par les acteurs du territoire du système de recharge maîtrisée des aquifères est indispensable pour rendre intelligibles les controverses, analyser les représentations, les rapports de pouvoir, les mécanismes de confiance et les attentes des acteurs concernés. Cela éclaire également les conditions dans lesquelles les connaissances scientifiques sont produites, discutées et mobilisées dans l'action publique concernée par la mise en œuvre de système de recharge maîtrisée des aquifères. Les sciences humaines et sociales pourraient être mobilisées dès les phases amont du projet pour recueillir, par enquête, l'avis des acteurs sur les solutions proposées. Cette interaction s'appuie sur des scénarios contrastés de mise en œuvre des solutions, afin d'identifier les caractéristiques susceptibles d'alimenter les débats : caractéristiques techniques des ouvrages, usages envisagés, risques environnementaux perçus, répartition des coûts et des bénéfices ou encore modalités de décision. L'enjeu n'est pas de répondre à une controverse existante mais d'anticiper celles qui pourraient émerger autour d'une technologie ou solution encore absente du territoire afin d'en comprendre les ressorts et de préparer les conditions d'un dialogue futur. Quelques premières discussions avec des acteurs pourraient mettre en évidence l'importance des enjeux de justice sociale (qui bénéficiera de ces ouvrages ? qui en supportera les coûts ? qui participera à la décision ?) ainsi que le rôle des valeurs associées à la gestion de l'eau. Certaines controverses pourraient ainsi porter sur l'action faite sur les milieux ou sur la compatibilité des infrastructures associées avec des principes de sobriété dans l'usage des ressources. Les enseignements tirés de cette enquête pourraient être ensuite mobilisés dans une démarche de co-construction associant les parties prenantes afin d'explorer les conditions dans lesquelles des compromis pourraient être construits autour de différents scénarios de mise en œuvre.

- La prise en compte de l'ensemble des co-bénéfices environnementaux et sociétaux associés aux systèmes de recharge maîtrisée des aquifères participe à balance économique du système en compensant leurs coûts de mise en œuvre et en apportant de nouveaux critères nécessaires à la prise de décision de mise en œuvre. Les co-bénéfices environnementaux (lien avec la nature et la santé) sont souvent la clé favorisant les systèmes de recharge maîtrisée des aquifères (particulièrement ceux s'inscrivant comme solution fondées sur la nature) aux autres solutions, L'évaluation socio-économique des co-bénéfices associés aux systèmes de recharge maîtrisée est indispensable pour mettre en valeur l'intérêt de ces systèmes dans la lutte contre les îlots de chaleur, dans la mise en place d'espaces de nature et de bien-être, dans la protection de la faune et la flore, dans l'éducation etc.

- L'identification du ou des porteurs de projet de recharge maîtrisée des aquifères au sein des acteurs du territoire est d'importance pour que l'engagement durable en faveur de la qualité de l'eau requise pour les usages soit garanti. La mise en place d'un comité incluant le porteur et les différents acteurs du territoire (usagers, riverains, financeurs, décideurs, opérateurs, ingénieurs, …) faciliterait la mise en place du pilotage, du financement, du suivi et du contrôle, de l'optimisation et de la communication sur le fonctionnement du système de recharge maîtrisée des aquifères. La question du financement devrait être étudiée avec l'ensemble des parties prenantes pouvant activer différents leviers

économiques tels que des subventions, des crédits d'impôt ou des partenariats public-privé (PPP) soutenant la réflexion de mise en œuvre et d'adaptation de mesures en compensant les coûts initiaux ou de développement. La mise en place d'un modèle économique du système de recharge maîtrisée d'aquifère est à rechercher pour assurer sa pérennité.

- La mise en adéquation du droit français avec les directives européennes est à anticiper en s'appropriant et en participant aux avancées et aux études des groupes de travail de la commission européenne associés aux systèmes de recharge maîtrisée des aquifères et aux thématiques auxquelles ils sont liés. Cela renforcerait les synergies entre les acteurs à l'échelle européenne et les retours d'expérience sur les systèmes de recharge maîtrisée des aquifères.

- Les effets cumulés de plusieurs dispositifs de recharge maîtrisée d'aquifère sur un même territoire ou bassin versant devraient être mieux étudiés afin d'identifier les bénéfices et les risques associés. Cette analyse pourrait être combinée aux autres mesures de gestion de l'eau (réutilisation des eaux usées traitées, solutions fondées sur la nature, réduction des prélèvements, …) afin d'évaluer la complémentarité et la pertinence des différentes actions mises en œuvre.

- L'anticipation de mise en place d'un système de gestion des données interopérables performant et partageable sur un temps long (durée de vie du système) faciliterait le suivi du système de recharge maîtrisée des aquifères entre les différents acteurs opérationnels mais aussi vers les services de l'état en charge de suivre le projet, les financeurs, les usagers, riverains, etc. La conception du système de gestion de données pourrait être mutualisée avec les remontées d'informations et de données utiles au complément d'une base de données nationale et d'un rapport de fonctionnement annuel du système de recharge maîtrisée des aquifères. Le système de gestion des données devrait également pouvoir articuler à moindre effort les données locales du système de recharge maîtrisée des aquifères à celles des réseaux de surveillance nationaux (réseaux de piézomètres et qualitomètres, de stations hydrométriques, etc.). Il serait aussi pertinent de mettre en œuvre cette gestion de données au regard de la partie législative et réglementaire demandant de « conserver trois ans les données correspondantes et de tenir celles-ci à la disposition de l'autorité administrative » (IOTA)[29].

- L'adaptation d'anciens dispositifs de rejets par le « sol », puisards, drains, … dans une logique de stratégie de recharge maîtrisée d'aquifère améliorerait, par la mise en place de fait du cadre réglementaire, la qualité des eaux souterraines et des écosystèmes associés et participerait à la protection adéquate en matière de santé humaine et d'environnement.

- La fédération nationale des acteurs pluridisciplinaires abordant les systèmes de recharge maîtrisée des aquifères favoriserait les retours d'expérience, la mise en œuvre de bonnes pratiques, une meilleure conception des systèmes et un transfert de méthodes et outils innovants. L'analyse fine des procédures de mise en œuvre des sites opérationnels pérennes existant via les documents d'étude et réglementaire mais aussi via le questionnement des acteurs fournirait des éléments clés pour la réalisation de guides et fiches techniques.

[29] https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000051217919

- La réalisation de guide(s) technique(s) ou de fiches techniques ou de bonnes pratiques, intégrant autant que possible la diversité des cas de recharge maîtrisée des aquifères et détaillant les procédures des étapes d'études ou d'opérations liés à la mise en œuvre d'un système de recharge maîtrisée des aquifères bénéficieraient aux acteurs techniques et opérationnels mais aussi aux personnes instruisant les dossiers.

- L'initiation et la formation des différents acteurs agissant dans la mise en œuvre des systèmes de recharge maîtrisée des aquifères sont indispensables à la compréhension et à la formulation des enjeux liés à ces pratiques. De rare formations existent qui devraient être déployées en mettant en avant autant les aspects techniques indissociables des géosciences et sciences de la nature que les aspects techniques de gouvernance, d'encadrements réglementaires et financiers. Les programmes de recharge maîtrisée des aquifères sont généralement complexes, multi-acteurs et transdisciplinaires et ne devraient être mis en œuvre et suivis que par des personnes initiées et formées.

Ces différents points pourraient être largement complétés en interviewant l'ensemble des acteurs ayant participé à la mise en œuvre de système de recharge maîtrisée des aquifères sur le territoire français. Ils reflètent néanmoins les points d'attention qui pourraient être approfondis en fonction des situations. En France, des acteurs pluridisciplinaires et multi-institutionnels s'intéressent aux solutions d'adaptations au changement climatique dont les systèmes de recharge maîtrisée des aquifères, et pourraient constituer une communauté dédiée afin d'approfondir les réflexions à l'échelle nationale. La communauté sur la recharge maîtrisée des aquifères pourrait travailler via des groupes de travail sur les aspects techniques et scientifiques, réglementaire, économique, de formation, de gouvernance, de base de données et de suivi etc. Les retours des groupes de travail pourraient participer à mettre en valeur les systèmes de recharge maîtrisée des aquifères et du savoir-faire français en la matière via : l'élaboration de guides techniques, l'initiation d'une base de données et de suivis des systèmes expérimentaux et opérationnels, l'appui à une stratégie nationale, la création de la communauté nationale sur la recharge maîtrisée des aquifères et la mise en valeur des systèmes aux échelles nationale, européenne et internationale par différents moyens de communication et d'organisation de rencontres ou d'évènements dédiées au sujet.

7. Conclusion

Dans un contexte marqué par l'accélération du changement climatique et par l'intensification des tensions sur la ressource en eau, la préservation des eaux souterraines constitue un enjeu majeur pour la sécurité hydrique des territoires, le maintien des usages et la préservation des écosystèmes. À l'échelle de notre territoire national, les eaux souterraines constituent pour certaines collectivités la ressource principale pour l'alimentation en eau potable. Concilier la préservation de la quantité et de la qualité de cette ressource est pour elles un enjeu majeur. Toutes les ressources en eau, conventionnelles ou non, toutes les options technologiques, de la haute technologie aux solutions fondées sur la nature, doivent être prises en compte dans la gestion intégrée des ressources en eau.

La recharge maitrisée des aquifères s'inscrit parmi les solutions susceptibles de contribuer à l'adaptation des territoires en renforçant les capacités de stockage naturel de l'eau. La recharge maitrisée des aquifères constitue un ensemble de pratiques visant à introduire de manière volontaire de l'eau dans les aquifères en maîtrisant les risques associés afin de répondre à des situations de stress hydrique ou environnemental des milieux aquatiques et de déséquilibre quantitatif et ou qualitatif des ressources en eau souterraine. Les dispositifs de recharge maitrisée des aquifères recouvrent une grande diversité de situations, de techniques, de ressources mobilisées et d'objectifs poursuivis. Ils peuvent contribuer au soutien quantitatif des nappes, à la limitation des intrusions salines, à la préservation des milieux aquatiques dépendant des eaux souterraines, à l'amélioration de la qualité de l'eau ou encore la sécurisation de l'approvisionnement en eau potable.

Toutefois, la recharge maitrisée des aquifères ne constitue pas une solution unique. Elle doit s'intégrer dans une stratégie globale de gestion de l'eau associant sobriété des usages, réduction des pollutions et préservation des milieux aquatiques. Chaque projet est dit site-spécifique et s'inscrit dans un contexte hydrogéologique, environnemental, climatique, règlementaire et socio-économique qui conditionne sa pertinence, sa faisabilité et ses effets. La mise en œuvre d'un dispositif de recharge maitrisée des aquifères n'est envisageable que lorsque plusieurs conditions sont réunies : un besoin avéré, la présence d'un aquifère adapté, la disponibilité d'une ressource en eau utilisée pour la recharge compatible avec les objectifs recherchés, ainsi qu'une démonstration que les bénéfices attendus justifient les investissements nécessaires et que les risques associés peuvent être maitrisés (objectifs environnementaux et gestion du colmatage). De nombreuses méthodes, techniques, outils et compétences existent et sont déployés lors des différentes étapes de mise en œuvre des systèmes de recharge maîtrisée des aquifères.

En effet, bien que les systèmes de recharge maitrisée des aquifères soient potentiellement porteurs de bénéfices, ils présentent également des risques qu'il faut identifier, évaluer et maitriser avec rigueur. Ces risques concernent aussi bien la performance et la pérennité des dispositifs que leurs incidences potentielles sur les eaux souterraines, les milieux aquatiques, les usages associés et plus largement, l'environnement. La conception et la mise en œuvre d'un dispositif de recharge maitrisée des aquifères s'inscrivent dans une temporalité longue (de l'ordre de 5 à 10 ans, voire plus dans le cas de projets complexes), depuis les études de préfaisabilité jusqu'à la phase d'exploitation. Les études préalables et de suivi notamment du milieu souterrain sont une condition indispensable à la maîtrise des risques, à la sécurisation des investissements et à la pérennité des dispositifs de recharge maitrisée des aquifères sur le long terme. Les retours d'expérience présentés dans ce guide démontrent la faisabilité de cette pratique dans plusieurs contextes français.

Les opérations de recharge maitrisée des aquifères s'inscrivent dans les objectifs de protections des eaux fixés par la Directive Cadre Européenne et sa déclinaison dans le droit national, ainsi que dans les procédures relatives à l'évaluation environnementale et à la protection de la santé publique. Les projets doivent s'inscrire dans une procédure de demande d'autorisation ou de déclaration, obtenir un permis qui devra être renouveler au cours du temps, et élaborer un programme de surveillance environnementale et de mesures d'alerte et de compensation en cas d'incidents. Ce cadre réglementaire permet un contrôle et un suivi des dispositifs qui limitent les risques.

Ce guide met en évidence plusieurs questionnements relatifs à l'absence de définition opérationnelle de la recharge maitrisée des aquifères, à la fragmentation du cadre réglementaire applicable ou encore au besoin de capitalisation des connaissances et des retours d'expérience. Ces constats soulignent l'intérêt d'entamer ou de poursuivre les réflexions associant l'ensemble des acteurs concernés pour favoriser le partage de connaissance et de renforcer la cohérence des approches mises en œuvre sur le territoire national. Enfin, ce guide a pour vocation de mettre à disposition un état des connaissances, des retours d'expérience et des éléments méthodologiques permettant d'éclairer l'appréciation de la pertinence de la recharge maitrisée des aquifères selon les contextes territoriaux dans le respect des objectifs de protection de l'environnement, de la santé publique et de gestion durable de l'eau.

8. Références bibliographiques

Alcalde-Sanz, L., Gawlik, B.M., 2017. Minimum quality requirements for water reuse in agricultural irrigation and aquifer recharge." Towards a legal instrument on water reuse at EU level. Publications Office of the European Union, Luxembourg. https://doi.org/10.2760/804116

ANSES, 2016. Risques sanitaires liés à la recharge artificielle de nappes d'eau souterraine, Avis de l'Anses. Rapport d'expertise collective. Saisine n°2012-SA-0255. URL https://www.anses.fr/fr/system/files/EAUX2012SA0255Ra.pdf

Asprilla-Echeverria John, 2021. The social drivers of cooperation in groundwater management and implications for sustainability. Groundwater for Sustainable Development, Volume 15, 2021, 100668, ISSN 2352-801X, https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100668.

Aussibal, A., Charbonnier, C., Duzan, A., 2016a. Aqua Renova, la restauration de la ressource en eau de la ville d'Hyères-les-Palmiers. Techniques Sciences Méthodes 99–122.

Aussibal, A., Charbonnier, C., Duzan, A., 2016b. Aqua Renova, la restauration de la ressource en eau de la ville d'Hyères-les-Palmiers. Astee TSM. https://doi.org/https://doi.org/10.1051/tsm/201612099

Australian Government, 2009. Australian Guidelines for Water Recycling. Managed Aquifer Recharge. National water quality management strategy. Document No 24. (July).

Beaudoin Christine, Steve Joncoux, Jean-François Jasmin, Albana Berberi, Chris McPhee, R. Sandra Schillo, Vivian M. Nguyen, 2022. A research agenda for evaluating living labs as an open innovation model for environmental and agricultural sustainability. Environmental Challenges, Volume 7, 2022, 100505, ISSN 2667-0100, https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100505.

Bertrand Guillaume, Paul Cary, Lise Cary, Ricardo Hirata, Emmanuelle Petelet-Giraud, Marc Steinmann, Victor Coelho, Suzana Montenegro, Anderson Paiva, Cristiano Almeida, 2022. Socio-environmental monitoring and co-management strategies to favor groundwater recharge and sustainable use in southern metropolises: Toward a co-managed aquifer recharge model? Current Opinion in Environmental Science & Health, Volume 27, 2022, 100350, ISSN 2468-5844, https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100350.

Bize J., Bourguet L., Lemoine J., 1972. L'alimentation artificielle des nappes souterraines. Ed. PARIS MASSON ET CIE, 199p.

Bouwer, H. 2002. Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. Hydrogeology Journal 10, 121–142 (2002). https://doi.org/10.1007/s10040-001-0182-4

Casanova, J., Cagnimel, M., Devau, N., Pettenati, M., Stollsteiner, P., 2013. Recharge artificielle des eaux souterraines : état de l'art et perspectives. Rapport final. BRGM/RP-61821-FR. 99 p., 16 ill., 18 ann. (61821).

Castro-Diaz, L., du Bray, M.V., Beresford, M., Jacob, C., Jankovic-Rankovic, J., Hallemeier, J., Harris, A., Low, G., Siegel, D., Sabo, J., Wutich, A., 2026. Social dimensions of Managed Aquifer Recharge: A scoping review. Journal of Environmental Management 402, 129129. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2026.129129

Comité de bassin Rhône Méditerranée, 2022. Les techniques de recharge maîtrisée d'aquifères. Des solutions envisageables pour la constitution de ressources de substitution dans le cadre des PTGE. Note du secrétariat technique du SDAGE.

Detay, M., 1997. La gestion active des aquifères, Masson. ed. Masson.

Dewandel, B., Lanini, S., Hakoun, V., Caballero, Y., Maréchal, J.-C., 2021. Artificial aquifer recharge and pumping: transient analytical solutions for hydraulic head and impact on streamflow rate based on the spatial superposition method. Hydrogeol J 29, 1009–1026. https://doi.org/10.1007/s10040-020-02294-9

Dillon, P., Alley, W., Zheng, Y., Vanderzalm (editors), J., 2022. Managed Aquifer Recharge: Overview and Governance. IAH Special Publication.

European Commission, 2024. Managed Aquifer Recharge (MAR), Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive and the Floods Directive. Guidance Document No. 39 doi:10.2779/9703167. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Gale, I., Neumann, I., Calow, R., Moench, M., 2002. The effectiveness of artificial recharge of groundwater : a review. URL https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/527471/ (accessed 2026.04.16).

Glass, J., Junghanns, R., Schlick, R., Stefan, C., 2022. The INOWAS platform: A web-based numerical groundwater modelling approach for groundwater management applications. Environmental Modelling & Software 155, 105452. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105452

Goren, O., Burg, A., Gavrieli, I., Negev, I., Guttman, J., Kraitzer, T., Kloppmann, W., Lazar, B., 2014. Biogeochemical processes in infiltration basins and their impact on the recharging effluent, the soil aquifer treatment (SAT) system of the Shafdan plant, Israel. Applied Geochemistry 48, 58–69. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.06.017

Guillemoto, Q., 2022. Transfert des molécules organiques traces des eaux usées traitées dans un système de Soil Aquifer Treatment (SAT): application à l'hydrosystème côtier d'Agon-Coutainville (PhD Thesis). Sorbonne université. URL https://theses.hal.science/tel-04061989/ (accessed 2026.04.21).

Guillemoto, Q., Picot-Colbeaux, G., Valdes, D., Devau, N., Mathurin, F.A., Pettenati, M., Kloppmann, W., Mouchel, J.-M., 2022. Transfer of trace organic compounds in an operational soil-aquifer treatment system assessed through an intrinsic tracer test and transport modelling. Science of the Total Environment 836, 155643.

Guillemoto, Q., Picot-Colbeaux, G., Valdes, D., Devau, N., Thierion, C., Idier, D., Mathurin, F.A., Pettenati, M., Mouchel, J.-M., Kloppmann, W., 2023. Multi-annual dynamics of a coastal groundwater system with soil-aquifer treatment and its impact on the fate of trace organic compounds. Water 15, 934.

Icekson-Tal, N., Avraham, O., Sack, J., Cikurel, H., 2003. Water reuse in Israel - the Dan Region Project: evaluation of water quality and reliability of plant's operation. Water Supply 3, 231–237. https://doi.org/10.2166/ws.2003.0067

Imig, A., Szabó, Z., Halytsia, O., Vrachioli, M., Kleinert, V., Rein, A., 2022. A review on risk assessment in managed aquifer recharge. Integrated Environmental Assessment and Management 18, 1513–1529.

Kloppmann, W., Aharoni, A., Chikurel, H., Dillon, P., Gaus, I., Guttman, J., Kraitzer, T., Kremer, S., Masciopinto, C., Miotlinski, K., 2012. Use of groundwater models for prediction and optimisation of the behaviour of MAR sites. Water reclamation technologies for safe managed aquifer recharge 311–349.

Lombard-Latune, R., Bruyere, M., 2023. Panorama de la réutilisation des eaux usées traitées en France en 2022. Epnac. 2023. https://doi.org/hal-04756776

Lyonnaise des Eaux, 2013. Synthèse du rapport annuel du délégataire. Hyères les Palmiers.

Lyonnaise des Eaux, 2012. Synthèse du rapport annuel du délégataire. Hyères les Palmiers.

Mankad Aditi, Andrea Walton, Kim Alexander, 2015. Key dimensions of public acceptance for managed aquifer recharge of urban stormwater. Journal of Cleaner Production, Volume 89, 2015, Pages 214-223, ISSN 0959-6526, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.028.

Maréchal, JC., Bouzit, M., Caballero, Y., Moiroux, F., 2019. Recommandations pour l'analyse de la préfaisabilité de la recharge de nappe au moyen d'eau de surface : application au Bassin RMC. Rapport final. BRGM/RP-68662-FR, 86 p., 51 ill. (RP-68662-FR). https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-68662-FR.pdf

Maurer, H., 2018. L'économie circulaire dans le petit cycle de l'eau : la réutilisation des eaux usées traitées. Institut national de l'économie circulaire. URL https://institut-economie-circulaire.fr/wp-content/uploads/2018/05/etude-leconomie-circulaire-dans-le-petit-cycle-de-leau-reut-inec.pdf

Ministère de la Transition écologique, 2023. Plan Eau – Dossier de presse : annexes. URL https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/23017_DP_PLAN%20EAU_annexes.pdf

Ministère de la Transition Ecologique, de la Biodiversité et des Négociations Internationales sur le Climat et la Nature, 2026. Cadrage national Envisager les projets de recharge maîtrisée des aquifères. Mesure 22 du plan d'action pour une gestion résiliente et concertée de l'eau.

Mumberg, T., Ahrens, L., Wanner, P., 2024. Managed aquifer recharge as a potential pathway of contaminants of emerging concern into groundwater systems – A systematic review. Chemosphere 364, 143030. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143030

Murray, R., 2009. A check-list for implementing successful artificial recharge projects. Republic of South Africa, Department Water Affairs (DWA), PRSA 000/00/11609/2 - Activity 12 (AR02).

Negev, I., Guttman, J., Kloppmann, W., 2017. The Use of Stable Water Isotopes as Tracers in Soil Aquifer Treatment (SAT) and in Regional Water Systems. Water 9, 73. https://doi.org/10.3390/w9020073

Picot-Colbeaux, G., Mathurin, F., Pettenati, M., Nakache, F., Guillemoto, Q., Baisset, M., Devau, N., Gosselin, M., Allain, D., Neyens, D., 2021. Case Study 16: Soil aquifer treatment system to protect coastal ecosystem in Agon-Coutainville (Normandy), France. Managing aquifer recharge: A showcase for resilience and sustainability 223–232.

Rahman, M.A., Rusteberg, B., Gogu, R.C., Ferreira, J.L., Sauter, M., 2012. A new spatial multi-criteria decision support tool for site selection for implementation of managed aquifer recharge. Journal of environmental management 99, 61–75.

Ross, A., Hasnain, S., 2018. Factors affecting the cost of managed aquifer recharge (MAR) schemes. Sustain. Water Resour. Manag. 4, 179–190. https://doi.org/10.1007/s40899-017-0210-8

Rupérez-Moreno, C., Pérez-Sánchez, J., Senent-Aparicio, J., Flores-Asenjo, P., Paz-Aparicio, C., 2017. Cost-Benefit Analysis of the Managed Aquifer Recharge System for Irrigation under Climate Change Conditions in Southern Spain. Water 9. https://doi.org/10.3390/w9050343

Russo, T.A., Fisher, A.T., Lockwood, B.S., 2015. Assessment of Managed Aquifer Recharge Site Suitability Using a GIS and Modeling. Groundwater 53, 389–400. https://doi.org/10.1111/gwat.12213

Sallwey, J., Bonilla Valverde, J.P., Vásquez López, F., Junghanns, R., Stefan, C., 2019. Suitability maps for managed aquifer recharge: a review of multi-criteria decision analysis studies. Environ. Rev. 27, 138–150. https://doi.org/10.1139/er-2018-0069

SDES, 2022. La ressource en eau renouvelable en France métropolitaine. Statistique publique de l'énergie, des transports, du logement et de l'environnement. URL https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/evolutions-de-la-ressource-en-eau-renouvelable-en-france-metropolitaine-de-1990-2018 (accessed 2026.03.07).

Seguin L., Rinaudo J.-D., Manceau J.-C., Frissant N., 2024. Etude prospective des effets du changement climatique dans le bassin versant des lacs du Born (Landes): processus participatif. BRGM/RP-73781-FR, 98p.

Seidl, C., Page, D., Wheeler, S.A., 2024. Using managed aquifer recharge to address land subsidence: Insights from a global literature review. Water Security 23, 100184. https://doi.org/10.1016/j.wasec.2024.100184

Stefan, C., Ansems, N., 2018. Web-based global inventory of managed aquifer recharge applications. Sustain. Water Resour. Manag. 4, 153–162. https://doi.org/10.1007/s40899-017-0212-6

SUEZ, 2021. S'adapter et agir face aux pressions sur la ressource en eau.

van der Gun, 2020. Conjunctive Water Management. A powerful contribution to achieving the Sustainable Development Goal. UNESCO, UNESCO. ed.

Van Houtte E. , J. Cauwenbergh, M. Weemaes, C. Thoeye, 2011. Indirect Potable Reuse via Managed Aquifer Recharge in the Torreele/St-André project. Dans C. Kazner, T. Wintgens, P. Dillon (Eds.), Advances in Water Reclamation Technologies for Safe Managed Aquifer Recharge, IWA Publishing, London, UK

Van Houtte, E., Verbauwhede, J., 2021. Environmental benefits from water reuse combined with managed aquifer recharge in the Flemish dunes (Belgium). International Journal of Water Resources Development 37, 1027–1034.

Vozinaki, AE.K., Anyfanti, I.V., Karatzas, G.P. et al. 2026. Sustainable Water Governance: Insights from Living Lab Experiences. Water Resour Manage 40, 10 (2026). https://doi.org/10.1007/s11269-025-04383-4

Wuilleumier, A., Seguin, J.J., 2008. Réalimentation artificielle des aquifères en France. Une synthèse. Rapport final BRGM/RP-55063-FR.

Zheng, Y., Ross, A., Villholth, K.G., Dillon, P., 2021. Managing aquifer recharge: a showcase for resilience and sustainability. UNESCO, Paris. URL https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000379962 (accessed 2026.02.24).

Annexe 1 Eléments bibliographiques complémentaires

ANSES, 2016. Risques sanitaires liés à la recharge artificielle de nappes d'eau souterraine, Avis de l'Anses. Rapport d'expertise collective. Saisine n°2012-SA-0255. URL https://www.anses.fr/fr/system/files/EAUX2012SA0255Ra.pdf

Australian Government, 2009. Australian Guidelines for Water Recycling. Managed Aquifer Recharge. National water quality management strategy. Document No 24. (July).

Bize, J., Bourguet, L., Lemoine, J. 1972. L'alimentation artificielle des nappes souterraines. Masson, France, 199p

Casanova, J., Cagnimel, M., Devau, N., Pettenati, M., Stollsteiner, P., 2013. Recharge artificielle des eaux souterraines : état de l'art et perspectives. Rapport final. BRGM/RP-61821-FR. 99 p., 16 ill., 18 ann. (61821).

Dillon, P., Alley, W., Zheng, Y., Vanderzalm (editors), J., 2022. Managed Aquifer Recharge: Overview and Governance. IAH Special Publication.

European Commission, 2024. Managed Aquifer Recharge (MAR). Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive and the Floods Directive. Guidance Document No. 39. Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi:10.2779/9703167.

Maréchal, JC., Bouzit, M., Caballero, Y., Moiroux, F., 2019. Recommandations pour l'analyse de la préfaisabilité de la recharge de nappe au moyen d'eau de surface : application au Bassin RMC. Rapport final. BRGM/RP-68662-FR, 86 p., 51 ill. (RP-68662-FR). https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-68662-FR.pdf

Wuilleumier, A., Seguin, J.J., 2008. Réalimentation artificielle des aquifères en France. Une synthèse. Rapport final BRGM/RP-55063-FR.

Dickens, C., Smakhtin, V., Biancalani, R., Villholth, K.G, Eriyagama, N. et Marinelli, M. 2020. Comment inclure les besoins environnementaux en eaux dans l'indicateur 6.4.2 du «stress hydrique» – Directives pour une méthode standard minimale pour le rapport mondial. Rome, FAO. ISBN 978-92-5-133485-0

Législation et règlementation

Directive 2024/3019 du Parlement européen sur le traitement des eaux résiduaires urbaines (DERU) https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=OJ:L_202403019

Directive 2006/7/CE du Parlement européen sur la gestion de la qualité des eaux de baignade https://eur-lex.europa.eu/FR/legal-content/summary/bathing-water-quality.html

Directive 92/43/CEE du Conseil du 21 mai 1992 concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000339498

Annexe 2 Précisions réglementaires et législatives

A/ Recherche des terminologies pouvant se rapporter à la recharge maîtrisée des aquifères

Pour rappel dans le cadre réglementaire national et européen la terminologie « recharge maîtrisée des aquifères » n'est pas reprise. Il est mentionné la « Recharge Artificielle des eaux souterraines » et le « Rejet sur le sol ou dans le sous-sol » (d'eau pluviale ou d'effluents).

1. Mention de la recharge artificielle des eaux souterraines dans le code de l'environnement

- Soumission des projets de recharge artificielle des eaux souterraines à une procédure d'autorisation :

Article R214-1 du code de l'environnement : les projets de recharge artificielle des eaux souterraines sont soumis à autorisation, sous la rubrique « 2.3.2.0. Recharge artificielle des eaux souterraines (A) ».

- Soumission des projets de recharge artificielle des eaux souterraines à évaluation environnementale (étude d'impact) :

Article R122-2 du code envt. Annexe : nomenclature des projets soumis à évaluation environnementale : 17. Dispositifs de captage et de recharge artificielle des eaux souterraines (telles que définies à l'article 2.2 de la directive 2000/60/ CE) :

- Evaluation environnementale systématique : si le volume annuel d'eaux à recharger est supérieur ou égal 10 millions de mètres cubes ;
- Evaluation environnementale au cas par cas : si les dispositifs de recharge artificielle des eaux souterraines ont un volume annuel d'eaux à recharger inférieur à 10 millions de mètres cubes.

Ces dispositions du code de l'environnement relatives à l'évaluation environnementale des projets de recharge résultent de la transposition de la directive 2011/92/UE sur l'évaluation environnementale (Annexe 1 – 11.)

2. La recharge artificielle des eaux souterraines dans la directive cadre sur l'eau :

L'un des objectifs environnementaux de l'article 4 est la non-détérioration des masses d'eau par rapport à leur état existant.

En particulier concernant les eaux souterraines, le principe est l'interdiction du rejet direct de polluants dans les eaux souterraines (articles 4 et 11.j).

Les Etats membres doivent mettre en place une procédure d'autorisation préalable pour tout projet de recharge ou d'augmentation artificielle des masses d'eau souterraines (article 11-f)). La soumission à autorisation, au titre de la rubrique 2.3.2.0 de la nomenclature IOTA, prévue à l'article R214-1 du code de l'environnement, constitue la transposition de cette disposition en droit français.

Il est indiqué à l'article 11-f) de la DCE que « L'eau utilisée peut provenir de toute eau de surface ou eau souterraine, à condition que l'utilisation de la source ne compromette pas la réalisation

des objectifs environnementaux fixés pour la source ou pour la masse d'eau souterraine rechargée ou augmentée ».

Par conséquent, il ne semble pas y avoir de restrictions de principe concernant l'origine des eaux utilisées pour la recharge artificielle. La condition à respecter est que le projet ne détériore pas la masse d'eau et qu'il ne compromette pas la réalisation des objectifs de bon état. Au niveau national, le bon état chimique d'une masse d'eau souterraine est apprécié conformément à l'arrêté du 17 décembre 2008.

Les eaux de surface sont définies à l'article 2 de la DCE comme « les eaux intérieures, à l'exception des eaux souterraines, les eaux de transition et les eaux côtières, sauf en ce qui concerne leur état chimique, pour lequel les eaux territoriales sont également incluses ». Les eaux intérieures sont définies comme « toutes les eaux stagnantes et les eaux courantes à la surface du sol et toutes les eaux souterraines en amont de la ligne de base servant pour la mesure de la largeur des eaux territoriales ».

3. Définition juridique de la recharge artificielle des eaux souterraines

On ne trouve pas de définition de la notion de « recharge artificielle des eaux souterraines » dans les textes nationaux ou européens. Cependant, un arrêt de la Cour de justice des Communautés européennes (CJCE, 2009-10-15, n° C-263/08) de 2009, précise que la notion n'est pas restreinte aux projets qui implique l'utilisation ultérieure des eaux. En l'espèce, « un projet […] portant sur l'évacuation des eaux d'infiltration dans un tunnel qui abrite des lignes électriques et l'injection d'eau dans le sol ou la roche afin de compenser une baisse éventuelle du niveau des eaux souterraines ainsi que sur la réalisation et le maintien d'installations d'évacuation et d'apport d'eau » doit être considéré comme dispositif de recharge artificielle des eaux souterraines.

La notion de recharge artificielle des eaux souterraines implique que seuls les projets conduisant à la mise en place d'un « dispositif » de recharge sont concernés (par exemple, l'aménagement d'installations spécifiques qui n'existent pas naturellement, comme l'aménagement d'un bassin d'infiltration). Ainsi, les opérations d'alimentation significative et non naturelle d'un aquifère par accélération ou augmentation des transferts des eaux sont donc visées.

4. Concernant les eaux des installations industrielles

- Stations d'épuration

Les stations d'épuration relèvent de la rubrique 2.1.1.0 de la nomenclature IOTA (article R214-1 du code de l'environnement)

L'arrêté du 21 juillet 2015 fixe les prescriptions à respecter pour ce type d'installation. L'article 8 de cet arrêté indique que « Dans le cas où une impossibilité technique ou des coûts excessifs ou disproportionnés ne permettent pas le rejet des eaux usées traitées dans les eaux superficielles, ou leur réutilisation, ou encore que la pratique présente un intérêt environnemental avéré, ces dernières peuvent être évacuées par infiltration dans le sol, après étude pédologique, hydrogéologique et environnementale, montrant la possibilité et l'acceptabilité de l'infiltration. ». La suite de l'article 8 dresse la liste des éléments contenues dans cette étude.

Pour les stations de traitement des eaux usées d'une capacité nominale supérieure à 600 kg/j de DBO5, l'exploitant de la station met en place une surveillance, destinée à évaluer et remédier au « risque de détérioration de la qualité de l'eau souterraine réceptrice par les substances dangereuses et par les polluants non dangereux visés aux annexes de l'arrêté du 17 juillet 2009 susvisé si nécessaire »

- Autres installations ?

Pour les autres activités (ex : eaux piscicoles), il convient de regarder au niveau sectoriel, les prescriptions applicables à chaque activité (un arrêté de prescriptions nationales, applicable à l'activité en question, pourrait interdire la réutilisation de ces eaux dans le cadre d'un projet de recharge artificielle des eaux souterraines).

B/ Recherche des textes de lois européens et nationaux pouvant se rapporter à la mise en œuvre de système de recharge maîtrisée des aquifères

CADRE européen

L'article 191 du Traité sur le fonctionnement de l'Union européenne (TFUE) précise que la politique de l'Union dans le domaine de l'environnement est fondée sur les principes de précaution et d'action préventive, sur le principe de correction — par priorité à la source — des atteintes à l'environnement, ainsi que sur le principe du pollueur-payeur. Cet article rappelle également qu'il convient de tenir compte, le plus tôt possible, des incidences sur l'environnement de tous les processus techniques de planification et de décision. Dans une optique d'harmonisation des principes d'évaluation des incidences sur l'environnement des projets publics et privés, la directive 2011/92/UE a été élaborée afin de répondre à cette problématique.

Directive 2011/92/UE (évaluation des incidences de certains projets publics et privés sur l'environnement)

Cette directive stipule que les principes d'évaluation des incidences sur l'environnement doivent être harmonisés en ce qui concerne les principales obligations des maîtres d'ouvrage et le contenu de l'évaluation. Toutefois, les États membres peuvent établir des règles de protection de l'environnement plus strictes ou mieux adaptées à leur contexte national.

Il est rappelé que l'un des objectifs premiers de l'Union européenne, dans le cadre du principe de précaution et de l'évaluation environnementale qui lui est associée, est de préserver le milieu ambiant et la qualité de vie.

Cependant, cette directive ne fixe que des principes généraux d'évaluation des incidences sur l'environnement, censés guider les procédures d'autorisation des projets publics et privés susceptibles d'avoir un impact sur celui-ci. La directive comprend 15 articles. Ceux présentant un intérêt particulier pour les dispositifs d'infiltration construits en vue d'assurer une recharge maîtrisée des aquifères sont mentionnés ci-dessous.

Parmi ces derniers, l'article 3 de la directive rappelle explicitement que l'évaluation environnementale doit identifier, décrire et évaluer de manière appropriée, et en fonction de chaque cas particulier, les incidences directes et indirectes d'un projet de recharge maîtrisée des aquifères sur les facteurs suivants :

- L'homme, la faune et la flore.
- Le sol, l'eau, l'air, le climat et le paysage.
- Les biens matériels et le patrimoine culturel.
- L'interaction entre les facteurs visés aux points I, II et III.

Une attention particulière à la réduction des risques de pollution est explicitement mentionnée dans cette directive, avec un renvoi direct aux exigences de la directive 2008/1/CE du Parlement européen et du Conseil du 15 janvier 2008 relative à la prévention et à la réduction intégrées de la pollution.

L'article 4 rappelle que les types de projets identifiés comme nécessitant une évaluation environnementale avant leur réalisation sont mentionnés dans la directive. Celle-ci précise explicitement que les dispositifs de recharge maîtrisée des aquifères, quel que soit le dispositif retenu, font partie des projets soumis à évaluation environnementale (Annexe I). Cet article indique également que la décision de rendre cette évaluation automatique ou de la réaliser au cas par cas est laissée à l'appréciation des États membres. Ces derniers sont également tenus de définir les seuils ou critères déterminant si l'évaluation environnementale doit être réalisée de manière systématique ou non.

L'article 5 précise le type d'informations devant être fournies dans le cadre de la procédure d'évaluation environnementale par le maître d'ouvrage aux autorités compétentes, ainsi qu'au public susceptible d'être concerné par le projet. Il rappelle également que les modalités de rédaction de chaque évaluation environnementale doivent être définies par chaque État membre, soit en établissant une procédure spécifique, soit en l'intégrant à des procédures d'évaluation déjà existantes.

Les informations minimales que doit fournir le maître d'ouvrage sont les suivantes :

- Une description du projet comportant des informations relatives au site, à la conception et aux dimensions du projet.
- Une description des mesures envisagées pour éviter, réduire et, si possible, compenser les incidences négatives importantes.
- Les données nécessaires pour identifier et évaluer les principaux effets que le projet est susceptible d'avoir sur l'environnement.
- Une présentation des principales solutions de substitution examinées par le maître d'ouvrage, ainsi que les raisons de son choix au regard des incidences sur l'environnement.
- Un résumé non technique des informations mentionnées ci-dessus.

Les articles suivants rappellent :

- Les obligations des États membres de mettre en place des procédures d'évaluation et de désigner les autorités compétentes pour leur mise en œuvre (articles 6 et 8).
- La nécessité, dans le cas de projets transfrontaliers, d'identifier si le projet aura un impact sur un autre État membre et d'organiser les procédures d'information entre États (article 7).
- Les modalités de communication des décisions prises par les autorités compétentes (article 9).
- La prise en compte du secret commercial et industriel, notamment la propriété intellectuelle, ainsi que la protection de l'intérêt public lors de la procédure d'évaluation environnementale et de sa diffusion (article 10).
- L'articulation de la procédure d'évaluation environnementale avec le cadre juridique propre à chaque État membre (article 11).
- L'obligation d'échange d'informations entre États membres et avec la Commission européenne (articles 12 et 13).

Cette directive ne fixe toutefois pas de cadre opérationnel ni de guide technique pour la conduite des évaluations environnementales. Cette absence rend nécessaire le recours à d'autres directives émises par la Commission européenne, le Parlement européen et le Conseil.

Au regard des impacts potentiels liés à la construction et à l'exploitation de systèmes de recharge maîtrisée des aquifères, il est donc nécessaire de se référer à la Directive-cadre sur l'eau, qui

vise à protéger et à gérer durablement les ressources en eau, en établissant un cadre législatif commun pour l'ensemble des États membres.

Directive cadre sur l'eau

La Directive-cadre sur l'eau (2000/60/CE), adoptée le 23 octobre 2000, établit un cadre pour une politique globale à l'échelle de l'Union européenne dans le domaine de la gestion et de la protection des ressources en eau. Elle concerne à la fois les eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau, eaux de transition et eaux côtières) et les eaux souterraines.

La Directive-cadre sur l'eau est composée de 26 articles. Les informations relatives aux aléas potentiels liés à la construction et à la mise en service de bassins d'infiltration pour la recharge maîtrisée des aquifères y sont notamment précisées.

Parmi ces articles, l'article 4 définit les objectifs environnementaux associés aux ressources en eau, afin de rendre opérationnels les programmes de mesures prévus dans les plans de gestion des districts hydrographiques de chaque État membre. Concernant les eaux souterraines, cet article précise que les États membres doivent :

- Mettre en œuvre les mesures nécessaires pour prévenir et limiter le rejet de polluants dans les eaux souterraines, ainsi que pour éviter la détérioration de l'état de toutes les masses d'eau souterraines.
- Protéger, améliorer et restaurer toutes les masses d'eau souterraines, assurer un équilibre entre les prélèvements et le renouvellement des eaux souterraines, afin d'obtenir un bon état de ces masses d'eau conformément aux dispositions de l'annexe V.
- Mettre en œuvre les mesures nécessaires pour inverser toute tendance significative et durable à la hausse de la concentration de polluants résultant des activités humaines, afin de réduire progressivement la pollution des eaux souterraines.

L'article 8 stipule que chaque État membre doit assurer une surveillance des masses d'eau au sein de chaque district hydrographique afin d'en déterminer l'état. Pour les eaux souterraines, cette évaluation repose sur les aspects chimiques et quantitatifs. Des programmes de surveillance opérationnels doivent donc être mis en place par chaque État membre. Les spécifications techniques et les méthodes normalisées d'analyse et de suivi de l'état des eaux sont établies conformément aux critères définis dans l'annexe V.

L'article 17 énumère les stratégies visant à prévenir et à contrôler la pollution des eaux souterraines. Il rappelle que ces stratégies comprennent des mesures destinées à atteindre un bon état chimique des eaux souterraines, sur la base de critères d'évaluation (annexe II) et de critères d'identification des tendances significatives et durables à la hausse, ainsi que des points de départ des inversions de tendance (annexe V). Des critères plus stricts peuvent être adoptés par chaque État membre.

La Directive 2000/60/CE prévoit explicitement l'obligation de contrôle, notamment l'exigence d'une autorisation préalable pour la recharge maîtrisée des aquifères, à condition que la réalisation des objectifs environnementaux fixés pour la source ou la masse d'eau souterraine concernée ne soit pas compromise. Cette disposition renvoie directement à deux directives "filles" de la Directive-cadre sur l'eau :

- La Directive 2006/118/CE sur la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration.
- Et la Directive 2008/105/CE sur les normes de qualité environnementale.

Concernant la Directive 2006/118/CE, l'article 3 définit les critères pour l'évaluation de l'état chimique des eaux souterraines. Il précise qu'à des fins d'évaluation, des normes de qualité doivent être établies pour certains polluants, groupes de polluants ou indicateurs de pollution.

L'article 4 rappelle les procédures d'évaluation de l'état chimique des eaux souterraines. L'article 5 porte sur l'identification des tendances significatives et durables à la hausse de la concentration des polluants dans les masses d'eau, ainsi que sur la définition des points de départ des inversions de tendance. Cet article présente un intérêt particulier puisqu'il est nécessaire de s'assurer que l'introduction des eaux utilisées pour la recharge ne provoque pas une évolution durable des concentrations de certains polluants dans la nappe ciblée.

Enfin, l'article 6 rappelle que les dispositifs de recharge maîtrisée des aquifères ne sont pas visés par les mesures relatives à la prévention ou à la limitation des introductions de polluants dans les eaux souterraines. Les normes de qualité pour les eaux souterraines sont mentionnées dans l'annexe I, et l'annexe II présente les orientations et recommandations relatives à l'établissement des valeurs seuils par les États membres.

La Directive sur les normes de qualité environnementale établit les normes de qualité applicables dans le domaine de l'eau, principalement pour les eaux de surface. L'article 3 et les annexes associées précisent les normes de qualité environnementale (NQE) applicables aux substances prioritaires et à certains autres polluants. L'annexe I définit deux types de normes :

- Les valeurs basées sur la concentration moyenne annuelle (NQE-MA).
- Et celles basées sur la concentration maximale admissible (NQE-CMA).

Lorsque les NQE-CMA sont indiquées comme « sans objet », les valeurs fixées pour les NQE-MA sont considérées comme assurant une protection suffisante contre les pics de pollution à court terme, notamment dans le cas de rejets continus. Les NQE définies pour les substances prioritaires et certains autres polluants figurent dans l'annexe I, tandis que l'annexe III répertorie les substances susceptibles d'être ajoutées à la liste des substances prioritaires ou classées comme substances dangereuses prioritaires.

Ces deux directives sont susceptibles d'évoluer à la lumière de la proposition de directive 2022/0344, portée par la Commission européenne, visant à améliorer la réglementation sur les eaux souterraines et les eaux de surface. Cette proposition prévoit notamment :

- La mise à jour des listes de polluants, en ajoutant ou retirant certaines substances de la liste de surveillance.
- La révision des normes de qualité existantes (NQE et valeurs seuils).
- L'ajout de 23 nouvelles substances devant faire l'objet d'une NQE individuelle.
- L'ajout d'un groupe de substances PFAS (somme de 24 composés).
- La modification des NQE pour 14 substances concernant les eaux de surface.
- Pour les eaux souterraines : l'ajout de deux substances pharmaceutiques, la modification de la valeur seuil pour les métabolites non pertinents de pesticides, l'intégration d'un groupe PFAS et l'ajout d'un pesticide à l'annexe II.

L'existence de cette proposition souligne la nécessité d'une gestion proactive du risque lors de la réalisation d'essais d'infiltration ou d'injection, notamment en intégrant les polluants mentionnés dans cette proposition à la liste des paramètres à suivre lors des expérimentations.

Directive sur la production d'eau destinées à la consommation humaine

La Directive (2020/2184) a été adoptée pour protéger la santé humaine en garantissant que l'eau destinée à la consommation soit salubre et propre. Elle introduit de nouvelles règles pour surveiller la qualité de l'eau et établir des exigences en matière d'hygiène pour les matériaux en contact avec l'eau potable.

L'Article 1 rappelle la nature des eaux retenues pour la production d'eaux destinées à la consommation humaine.

L'Article 4 précise que les eaux destinées à la consommation humaine ne doivent pas contenir un nombre ou une concentration de micro-organismes, de parasites ou de substances constituant un danger potentiel pour la santé humaine.

L'Article 5 de la Directive précise que les Etats membres fixent, sur la base des informations fournies dans l'Annexe I, la liste minimale des substances à suivre pour caractériser les eaux brutes utilisées pour la production d'eau destinées à la consommation humaine et les eaux destinées à la consommation humaine sensu-stricto. Il est également rappelé que les Etats membres peuvent élargir la liste des substances en ajoutant des substances supplémentaires non mentionnées dans l'Annexe I, ainsi que les valeurs seuils associées, lorsque la protection de la santé humaine sur le territoire national, ou une partie de celui-ci l'exige.

L'Article 8 mentionne explicitement qu'une surveillance renforcée et appropriée doit être conduite, dans les eaux de surface ou les eaux souterraines ou dans ces 2 types d'eau, dans les ressources utilisées pour la production d'eaux destinées à la consommation humaine, notamment à proximité des zones de captages. Cet article détaille les éléments à surveiller :

Les paramètres figurant à l'Annexe I de la présente Directive ;

Les polluants des eaux souterraines figurant à l'Annexe I de la Directive 2006/118/CE du Parlement européen et du Conseil ainsi que des polluants et des indicateurs de pollution pour lesquels des valeurs seuils ont été établies par les Etats membres conformément à l'Annexe II de ladite Directive ;

Les substances prioritaires et certains polluants figurant à l'Annexe I de la Directive 2008/105/Ce du Parlement européen et du Conseil ;

Les polluants spécifiques à des bassins hydrographiques, déterminés par les Etats membres conformément à la Directive 2000/60/CE ;

Les autres polluants pertinents pour les eaux destinées à la consommation humaine, déterminés par les Etats membres ;

Les substances présentes à l'état naturel qui pourraient constituer un danger pour la santé humaine du fait de l'utilisation des eaux destinées à la consommation humaine ;

Les substances et composés inscrits sur la liste de vigilance établie à l'Article 13 de la présente Directive

L'Article 13 précise les caractéristiques et les spécificités pour réaliser la surveillance des eaux brutes destinées à la consommation humaine et des eaux destinées à la consommation humaine sensu-stricto.

L'Article 14 préciser les mesures correctives et restriction d'utilisation à prendre lorsque le non-respect des valeurs seuils pour les substances réglementées est constaté. Il stipule ainsi qu'une enquête doit être immédiatement effectuée afin d'en déterminer la cause.

CADRE national

La transcription de la réglementation européenne mentionnée ci-dessus a été réalisée dans le droit français sous la forme d'évolutions du Code de l'environnement. Les articles pertinents, ainsi que les arrêtés associés, relatifs aux spécificités des dispositifs d'infiltration mis en œuvre dans le cadre du projet de recharge maîtrisée d'aquifère, sont rappelés ci-dessous.

Au regard du cadre législatif et réglementaire défini dans le Code de l'environnement pour l'étude d'évaluation environnementale des dispositifs de recharge maîtrisée des aquifères, cadre aligné sur les critères définis dans les directives européennes mentionnées précédemment, il convient également de prendre en compte les articles législatifs et réglementaires inscrits dans le Code de la santé publique.

En complément de ce cadre législatif et réglementaire, des préconisations sont également émises par les autorités compétentes chargées de l'évaluation et de la mise en œuvre opérationnelle des dispositifs de recharge maîtrisée des aquifères. Des indications relatives aux critères de mise en œuvre figurent également dans certaines actions publiques menées par l'autorité en charge de l'environnement.

Ces différentes sources d'information, utiles à l'élaboration de l'évaluation environnementale requise pour obtenir l'autorisation de mise en service d'un dispositif de recharge maîtrisée des aquifères, sont présentées ci-dessous. L'objectif est de souligner les points d'attention essentiels à considérer pour la caractérisation des impacts potentiels de ce type de dispositif sur l'état chimique des eaux souterraines et des milieux qui leur sont connectés.

Code de l'environnement

Le Code de l'environnement, dans ses articles L.122-1 à L.122-15, R.122-1 à R.122-5 et R.124-1, stipule que la création d'un bassin d'infiltration destiné à la recharge maîtrisée des aquifères nécessite la réalisation d'une évaluation environnementale. Les informations essentielles relatives à ces articles sont rappelées ci-dessous.

Evaluation environnementale pour les dispositifs de recharge maitrisée des aquifères

a) Partie législative

La création d'un système de recharge maîtrisée d'aquifère est considérée comme un travail de construction, d'installation ou d'ouvrage réalisé dans le milieu naturel ou le paysage, en vue d'un usage des ressources du sous-sol.

L'alinéa II de l'article L.122-1 du Code de l'environnement définit que ce type de projet, en raison de sa nature, de sa dimension et de sa localisation, est susceptible d'avoir des incidences notables sur l'environnement ou sur la santé humaine. À ce titre, il doit faire l'objet d'une évaluation environnementale, selon des critères ou des seuils fixés par voie réglementaire, et, pour certains projets, à l'issue d'un examen au cas par cas.

Cet article précise également que, pour les projets relevant d'un examen au cas par cas, il est tenu compte des éléments mentionnés à l'annexe III de la directive 2011/92/UE modifiée du

Parlement européen et du Conseil du 13 décembre 2011 relative à l'évaluation des incidences de certains projets publics et privés sur l'environnement.

L'alinéa II indique en outre que l'autorité compétente, chargée de l'examen au cas par cas, décide de soumettre ou non un projet à une évaluation environnementale. La décision rendue doit préciser les objectifs spécifiques poursuivis par la réalisation de cette évaluation.

L'alinéa III rappelle que l'évaluation environnementale constitue un processus comprenant l'élaboration, par le maître d'ouvrage, d'un rapport d'évaluation des incidences sur l'environnement. Ce rapport rassemble l'ensemble des informations nécessaires pour décrire et apprécier de manière appropriée, selon les caractéristiques propres à chaque cas, les incidences notables, directes et indirectes, du projet sur :

i) la population et la santé humaine.

ii) la biodiversité, en accordant une attention particulière aux espèces et aux habitats protégés au titre de la directive 92/43/CEE du 21 mai 1992 et de la directive 2009/147/CE du 30 novembre 2009.

iii) les terres, le sol, l'eau, l'air, la consommation énergétique et le climat.

iv) les biens matériels, le patrimoine culturel et le paysage.

v) les interactions entre les facteurs mentionnés aux points i à iv.

Les incidences sur ces facteurs incluent également celles susceptibles de résulter de la vulnérabilité du projet aux risques d'accidents majeurs ou de catastrophes naturelles pertinentes pour le projet concerné.

Les caractéristiques du projet impliquent que celui-ci soit soumis à une évaluation environnementale systématique ou à un examen au cas par cas (voir ci-dessous). Conformément à l'alinéa IV, l'autorité compétente, saisie par le maître d'ouvrage, est chargée d'examiner le projet afin de déterminer s'il doit être soumis à une évaluation environnementale.

L'article L.122-3 précise que le contenu de l'étude d'impact doit comprendre, au minimum :

- Une description du projet comportant des informations relatives à sa localisation, sa conception, ses dimensions et ses autres caractéristiques pertinentes.
- Une description des incidences notables probables du projet sur l'environnement.
- Une description des caractéristiques du projet et des mesures envisagées pour éviter les incidences négatives probables sur l'environnement, réduire celles qui ne peuvent être évitées et compenser celles qui ne peuvent être ni évitées ni réduites.
- Une description des solutions de substitution raisonnables examinées par le maître d'ouvrage, en fonction des caractéristiques spécifiques du projet, ainsi qu'une indication des principales raisons du choix effectué, au regard de ses incidences sur l'environnement.
- Un résumé non technique des informations mentionnées ci-dessus.
- Toute information complémentaire, en fonction des caractéristiques spécifiques du projet et des éléments de l'environnement susceptibles d'être affectés, notamment en ce qui concerne la consommation d'espaces agricoles, naturels et forestiers résultant du projet lui-même.

b) Partie réglementaire

Le Code de l'environnement, dans ses articles R.214-1 et R.122-1 à R.122-6 de la section 1 du chapitre II du titre II du livre I de la partie réglementaire, définit le cadre réglementaire dans lequel l'évaluation environnementale doit être réalisée en fonction des caractéristiques techniques et opérationnelles de la création d'un système de recharge maîtrisée des aquifères.

L'article R.124-1 rappelle que les dispositifs de recharge maîtrisée d'aquifère sont classés comme des installations de rejet. Il précise également que la mise en place de ce type d'infrastructure est soumise à autorisation par les autorités nationales compétentes chargées de cette évaluation.

Les articles R.122-1 à R.122-14 définissent les critères applicables à la réalisation de l'évaluation environnementale des infrastructures soumises à autorisation.

L'article R.122-2 précise notamment les critères permettant de déterminer si l'évaluation environnementale doit être automatique ou réalisée au cas par cas, selon les caractéristiques du dispositif de recharge envisagé. Ces critères sont listés dans l'annexe I.

Selon cette annexe, sont soumis à une évaluation environnementale automatique les dispositifs de recharge dont le volume annuel d'eau rechargée est supérieur ou égal à 10 millions de mètres cubes. Pour les dispositifs de recharge présentant des volumes inférieurs, une évaluation environnementale au cas par cas est requise.

L'article R.122-3 précise les éléments attendus par les autorités compétentes pour l'évaluation d'un projet soumis à un examen au cas par cas. Ces éléments incluent :

- Les caractéristiques globales du projet, y compris d'éventuels travaux de démolition.
- Les incidences notables que le projet est susceptible d'avoir sur l'environnement et la santé humaine.
- Le cas échéant, les mesures et caractéristiques du projet destinées à éviter ou réduire ses effets négatifs.
- Les plans ou programmes pertinents relatifs aux mesures susceptibles d'être mises en œuvre pour limiter les impacts du projet.

L'article R.122-4 indique que le maître d'ouvrage peut demander à l'autorité compétente, chargée de la décision d'autorisation, de rendre un avis sur le champ et le degré de précision des informations à fournir dans l'étude d'impact, conformément à l'article L.122-1-2.

L'article R.122-5 précise que l'étude d'impact doit être proportionnée à la sensibilité environnementale de la zone susceptible d'être affectée par le projet, à l'importance et à la nature des travaux, ouvrages ou interventions envisagés, ainsi qu'à leurs incidences prévisibles sur l'environnement et la santé humaine.

Le même article définit également les informations à fournir par le maître d'ouvrage dans l'étude d'impact, à savoir :

- Un résumé non technique des informations mentionnées ci-dessous.
- une description du projet, incluant sa localisation, ses caractéristiques physiques (y compris, le cas échéant, les travaux de démolition nécessaires), les exigences en matière d'utilisation des terres pendant les phases de construction et de fonctionnement, les principales caractéristiques de la phase opérationnelle, la demande et l'utilisation d'énergie, la nature et les quantités de matériaux et de ressources naturelles utilisés, ainsi

qu'une estimation des types et quantités de résidus et d'émissions attendus (pollution de l'eau, de l'air, du sol, bruit, vibration, lumière, chaleur, rayonnement, déchets, etc.).
- Une description de l'état initial de l'environnement et de son évolution probable, avec ou sans mise en œuvre du projet, sur la base des données disponibles et des connaissances scientifiques actuelles.
- Une analyse des facteurs environnementaux susceptibles d'être affectés de manière notable par le projet : population, santé humaine, biodiversité, terres, sol, eau, air, climat, biens matériels, patrimoine culturel (architectural et archéologique) et paysage.
- Une évaluation des incidences notables du projet sur l'environnement, liées à la construction, à l'exploitation, à l'utilisation des ressources naturelles, à l'émission de polluants, aux nuisances et aux risques pour la santé ou le patrimoine.
- Une analyse du cumul des incidences avec d'autres projets existants ou approuvés, en tenant compte des problèmes environnementaux liés à l'utilisation des ressources naturelles et des zones à forte valeur écologique.
- Une description des incidences négatives susceptibles de résulter de la vulnérabilité du projet face à des risques d'accidents ou de catastrophes majeures, ainsi que des mesures prévues pour les éviter, les réduire ou y répondre en situation d'urgence.
- Une étude des solutions de substitution raisonnables examinées par le maître d'ouvrage, avec justification du choix retenu au regard de leurs incidences environnementales.
- Les mesures d'évitement, de réduction et de compensation envisagées, ainsi que leur justification lorsque la compensation n'est pas possible.
- Le cas échéant, les modalités de suivi des mesures proposées.
- Une description des méthodes et données utilisées pour identifier et évaluer les incidences.
- Les noms, qualités et qualifications des experts ayant contribué à la préparation de l'étude d'impact.

Les articles R.122-6 à R.122-8 précisent le contexte dans lequel l'évaluation de l'étude d'impact est réalisée par les autorités environnementales compétentes.

Les articles R.122-9 à R.122-13 détaillent les modalités d'information et de participation du public lors de la création de ce type d'infrastructure.

Enfin, l'article R.122-14 définit les conditions de décision et d'autorisation par les autorités environnementales désignées.

En l'absence de critères d'évaluation spécifiques permettant de caractériser l'impact du dispositif de recharge maîtrisée des aquifères sur la ressource en eau, il convient de se référer aux articles législatifs et réglementaires relatifs à la surveillance et à la gestion de la ressource en eau, tels que définis dans le Code de l'environnement.

Surveillance de la ressource en eau

Les objectifs environnementaux relatifs aux eaux souterraines, inscrits dans la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) et repris dans la réglementation française, figurent à la fois dans la partie législative et dans la partie réglementaire du Code de l'environnement. Les articles correspondants à ces deux parties sont détaillés ci-dessus.

a) Partie législative

L'article L.212-1 de la section 1, du chapitre II, du titre I du livre II du Code de l'environnement définit les objectifs de qualité et de quantité des eaux communs à chaque schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE). Ces objectifs sont les suivants :

- L'atteinte d'un bon état chimique et écologique pour les eaux de surface, à l'exception des masses d'eau artificielles ou fortement modifiées par les activités humaines.
- L'atteinte d'un bon potentiel écologique et d'un bon état chimique pour les masses d'eau de surface artificielles ou fortement modifiées par les activités humaines.
- L'atteinte d'un bon état chimique et d'un équilibre entre les prélèvements et la capacité de renouvellement pour les masses d'eau souterraines.
- La prévention de la détérioration de la qualité des eaux.

Il est également important de souligner que ces objectifs doivent être mis en relation avec les exigences législatives et réglementaires particulières applicables aux zones (eaux de surface ou eaux souterraines) relevant de la protection et de la conservation des habitats ou des espèces directement dépendants de l'eau, ainsi qu'aux masses d'eau destinées à la consommation humaine, actuelle ou future.

Cela implique que, dans le cadre d'un dispositif de recharge maîtrisée des aquifères, il convient de se référer aux dispositions du Code de la santé publique, lorsque le dispositif est susceptible d'influencer une nappe utilisée pour la production d'eau destinée à la consommation humaine.

En cas d'incertitudes concernant les impacts potentiels sur la ressource en eau souterraine, il sera nécessaire de mettre en place un plan de surveillance visant à démontrer la non-dégradation qualitative et quantitative de la nappe, ainsi que des dispositifs d'arrêt du dispositif de recharge permettant de prévenir toute dégradation de la ressource en eau.

b) Partie réglementaire

Ces objectifs sont traduits en exigences réglementaires, notamment dans les articles regroupés dans les sous-sections 4 à 6, définissant respectivement : les critères constitutifs des schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux, les critères et caractéristiques des programmes pluriannuels de mesures, ainsi que les critères et caractéristiques des méthodologies de surveillance et d'évaluation. Ces articles sont regroupés dans la section 1, du chapitre II, du titre I du livre II de la partie réglementaire du Code de l'environnement.

Parmi ces articles, l'article R.212-9 rappelle que, afin d'assurer la protection des eaux (eaux de surface et eaux souterraines) contre la pollution, les orientations du schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux doivent prendre en compte les dispositions des arrêtés du ministre chargé de l'environnement fixant les modalités et délais de réduction progressive des rejets directs ou indirects des substances prioritaires et des substances dangereuses, dont ils dressent la liste en application de l'article L.122-1.

L'article R.212-21-1 précise que, afin de prévenir ou réduire progressivement la pollution des eaux souterraines et conformément à l'article L.212-2-1, des mesures doivent être mises en œuvre pour inverser les tendances à la dégradation de l'état des eaux souterraines — qu'elles soient avérées ou potentielles — lorsqu'elles présentent un risque significatif et durable pour la qualité des écosystèmes aquatiques ou terrestres, pour la santé humaine ou pour les utilisations légitimes de l'environnement aquatique.

En complément, l'article R.212-22 définit les critères à retenir pour la mise en place d'un programme de surveillance destiné à évaluer l'état des eaux souterraines, ainsi que les modalités de sa mise en œuvre.

Dans le cadre d'un projet de recharge maîtrisée d'aquifère, ces dispositions impliquent de pouvoir démontrer que la recharge des eaux n'a pas entraîné une augmentation durable des

concentrations des substances et polluants listés dans les arrêtés définissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines.

Étant donné que la mise en place de dispositif de recharge maîtrisée d'aquifère peut modifier également les écoulements de surface, il est nécessaire de pouvoir démontrer l'absence d'augmentation durable des concentrations des substances et polluants listés dans les arrêtés définissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux de surface.

c) Arrêtés

Plusieurs arrêtés ont été délivrés par le ministère chargé de l'environnement afin de définir les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux de surface et souterraines.

Pour les eaux souterraines, l'Arrêté du 17 décembre 2008, modifié par l'Arrêté du 9 octobre 2023, établit les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines, y compris les tendances significatives et durables de dégradation de l'état chimique, ainsi que la détermination de l'état quantitatif.

L'article 4 précise que les valeurs seuils sont fixées de manière à permettre de constater que les conditions nécessaires pour atteindre le bon état chimique d'une masse d'eau souterraine sont remplies. Il rappelle également que si les résultats de la surveillance obtenus à un point représentatif dépassent l'une de ces valeurs, cela implique qu'une ou plusieurs conditions nécessaires à l'atteinte du bon état chimique risquent de ne pas être respectées.

L'article 5 définit les normes de qualité pour les nitrates et les pesticides (Annexe I), ainsi que les valeurs seuils pour les substances prioritaires et dangereuses (Annexe II), qui doivent être surveillées pour déterminer l'état chimique d'une masse d'eau souterraine. Il rappelle que, pour une masse d'eau souterraine donnée, si ces normes de qualité peuvent empêcher d'atteindre les objectifs définis à l'article L.212-1 pour les eaux de surface associées, ou entraîner une diminution significative de la qualité écologique ou chimique, ou un dommage significatif aux écosystèmes terrestres dépendant directement de la masse d'eau, des normes plus strictes peuvent être prises par le préfet coordonnateur de bassin.

Au regard de ces dispositions et des caractéristiques hydrogéologiques spécifique d'un site de recharge maîtrisée d'aquifère, il est nécessaire d'assurer un suivi de surveillance pour les eaux souterraines et les eaux de surface. Il convient également de mentionner le guide d'évaluation de l'état des eaux souterraines, publié en juillet 2019, qui détaille et explicite les procédures mentionnées dans l'Arrêté du 17 décembre 2008 modifié.

Des critères relatifs aux programmes de surveillance pour évaluer l'état chimique des eaux souterraines ont été mis à jour dans l'Arrêté du 26 avril 2022. L'article 2 et l'Annexe VIII associée définissent les substances à inclure dans les suivis de surveillance pour caractériser l'état chimique des eaux souterraines. L'Annexe VIII présente la liste socle des paramètres et substances à surveiller. Il est rappelé qu'il convient d'y ajouter les substances pour lesquelles une norme de qualité ou une valeur seuil a été fixée par l'Arrêté du 17 décembre 2008 modifié.

Les substances sont regroupées selon trois niveaux d'analyse pour le contrôle de surveillance de l'état chimique :

- Paramètres et substances faisant l'objet d'une surveillance régulière, comprenant des paramètres physico-chimiques et chimiques, ainsi que des substances appartenant à plusieurs familles d'usage selon la classification SANDRE.
- Paramètres surveillés de manière ponctuelle (analyse dite "photographique"), regroupant des substances de plusieurs familles d'usage selon la classification SANDRE.
- Paramètres surveillés à une fréquence intermédiaire, également regroupant des substances selon la classification SANDRE.

Pour les eaux de surface, l'Arrêté du 25 janvier 2010 modifié établit le programme de surveillance de l'état des eaux en application des dispositions législatives et réglementaires mentionnées ci-dessus.

L'article 11 précise que l'état chimique d'une masse d'eau de surface est considéré comme bon lorsque les concentrations en polluants ne dépassent pas les normes de qualité environnementale en tout point de la masse d'eau, hors zone de mélange. La liste des polluants et les normes correspondantes sont définies aux points 1.1 et 1.2 de l'Annexe VIII de l'Arrêté. L'article rappelle également comment ces critères doivent être utilisés pour définir l'état chimique de la masse d'eau de surface. Les modalités d'évaluation du respect des normes pour chaque polluant sont détaillées au point 1 de l'Annexe VIII, qui liste les paramètres physico-chimiques, chimiques et polluants à inclure dans la surveillance, ainsi que les normes correspondantes.

Comme pour les eaux souterraines, cet Arrêté a été modifié par l'Arrêté du 26 avril 2022. L'Annexe III de l'article 2 décrit la liste des paramètres à surveiller pour caractériser le bon état chimique des eaux de surface continentales. Ces listes constituent le socle minimal des substances à inclure dans la surveillance, pouvant être complétées par le préfet de bassin en fonction des enjeux locaux.

Ces listes constituent le socle de référence pour une majorité de projet de recharge maîtrisée des aquifères, pour les premières campagnes de mesure de la qualité des eaux de surface et souterraines sur le site de recharge, et constituent un élément clé pour l'élaboration du programme de surveillance qui sera déployé avant, pendant et après la mise en place de l'essai de recharge.

<u>Code de la santé publique</u>

Au regard du cadre législatif et réglementaire mentionné dans le code de l'environnement et des directives européennes citées ci-dessus, il est explicitement indiqué que les dispositifs de recharge maîtrisée des aquifères ne doivent pas dégrader les différents usages actuels et futurs des masses d'eau rechargées, notamment en ce qui concerne la production d'eaux destinées à la consommation humaine (EDCH). Il est donc nécessaire de tenir compte du cadre législatif et réglementaire défini dans le code de la santé publique à ce sujet.

Il est également important de rappeler qu'aucun cadre réglementaire, ni européen ni national, n'interdit la mise en place d'une infrastructure de recharge maîtrisée des aquifères dans une masse d'eau utilisée, ou susceptible de l'être, pour la production d'eau destinée à la consommation humaine. Le cadre législatif et réglementaire associé à cette production est rappelé ci-dessous.

Partie législative

Les Articles L1321-1 à 1321-10 du chapitre I, du Titre II, du Livre III du code de la santé publique définissent le cadre législatif relatif à la production d'eaux destinées à la consommation humaine.

Concernant les critères de qualité, l'Article L. 1321-4 précise qu'une ressource en eau utilisée pour la consommation humaine doit répondre à :

- Un plan de surveillance pour l'eau faisant l'objet de cette production ou de cette distribution.
- Un contrôle sanitaire conformément aux critères définis dans les articles de la partie réglementaire et les arrêtés associés.
- L'application de toutes mesures correctives nécessaires pour assurer la qualité de l'eau, ainsi que l'information des consommateurs en cas de risques sanitaires.

Partie réglementaire

Le cadre législatif mentionné ci-dessus est transposé dans le cadre réglementaire décrit dans les Articles R. 1321-1 à R. 1321-36, de la Section 1, du Chapitre I, du Titre II, du Livre III de la partie réglementaire.

Parmi ces articles, l'Article R. 1321-2 précise que les eaux destinées à la consommation humaine doivent :

- Ne pas contenir un nombre ou une concentration de micro-organismes, de parasites ou d'autres substances constituant un danger potentiel pour la santé des personnes.
- Être conformes aux limites de qualité, portant sur des paramètres microbiologiques et chimiques, définies par arrêté du ministre chargé de la santé.

L'Article R. 1321-3 indique que les eaux destinées à la consommation humaine doivent satisfaire à des références de qualité, portant sur des paramètres microbiologiques, chimiques et radiologiques, établies à des fins de suivi des installations de production, de distribution et de conditionnement d'eau, ainsi que pour l'évaluation des risques pour la santé des personnes, et fixées par arrêté du ministre chargé de la santé.

Les Articles R. 1321-10, R. 1321-15 et R. 1321-16 définissent les modalités relatives au programme de prélèvements et d'analyses du contrôle sanitaire pour les eaux destinées à la consommation humaine. Ils mentionnent respectivement la nécessité :

- De se référer à une liste de substances à surveiller.
- De définir des normes de qualité.
- De définir une fréquence de suivi.

Ces critères sont détaillés dans l'Arrêté du 11 janvier 2007, modifié par l'Arrêté du 30 décembre 2022.

Arrêtés

L'Arrêté du 11 janvier 2007, modifié, précise les limites et références des eaux brutes ainsi que des eaux destinées à la consommation humaine.

L'Article I définit les limites et références de qualité, les valeurs indicatives et les valeurs de vigilance pour les eaux destinées à la consommation humaine. Ces critères sont détaillés dans l'Annexe I. Ils sont complétés par ceux mentionnés dans l'Article 2, qui concernent les limites de qualité attendues pour les eaux brutes utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine. Ces valeurs seuils sont précisées dans l'Annexe II, laquelle liste les paramètres physico-chimiques, chimiques et les polluants devant être surveillés dans les eaux brutes destinées à la consommation humaine, ainsi que les limites de qualité correspondantes.

Parmi ces polluants, plusieurs familles de substances sont mentionnées, telles que définies dans le référentiel SANDRE.

Il est recommandé que ces paramètres doivent être inclus dans le programme de surveillance mis en place avant, pendant et après la mise en service de l'infrastructure de recharge conçue dans le cadre du projet s'ils ne sont pas déjà mentionnés dans les listes de surveillance définies pour définir l'état chimique des eaux de surface ou souterraines.

Saisine de l'ANSES

En complément du cadre législatif et réglementaire fourni par le Code de l'environnement et le Code de la santé publique, des préconisations ont également été formulées par des autorités compétentes en charge de l'évaluation opérationnelle des dispositifs de recharge maîtrisée des aquifères. Dans ce cadre, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) s'est auto-saisie le 27 novembre 2012 pour réaliser une évaluation qualitative des risques sanitaires liés à la recharge maîtrisée des nappes d'eau souterraine (Saisine n°2012-SA-0255).

Ce document recommande que la recharge maîtrisée des aquifères ne doit pas :

- Dégrader la qualité de l'eau de la nappe.
- Conduire à l'imposition de traitements supplémentaires pour les eaux prélevées, quel que soit leur usage, par rapport à des conditions similaires en l'absence de recharge.
- Préempter les usages actuels ou futurs des ressources en eau rechargées, notamment pour la production d'eaux destinées à la consommation humaine.
- Impliquer l'utilisation d'une eau de recharge dont la qualité est inférieure à celle de l'eau de la nappe.

Cette préconisation souligne également que les infrastructures de recharge maîtrisée des aquifères doivent être durables, ce qui nécessite notamment :

- Une gestion efficace du site de recharge.
- Un plan de surveillance permettant de détecter rapidement toute dégradation de la ressource rechargée.
- Des dispositifs de contrôle dont l'efficacité est démontrée.

Conformément au cadre réglementaire défini dans le Code de l'environnement (voir ci-dessus), la Saisine indique que le fonctionnement de l'infrastructure construite pour assurer la recharge maîtrisée des aquifères ne doit pas compromettre les objectifs environnementaux fixés pour la ressource rechargée. Il est également rappelé que ces infrastructures doivent contribuer à maintenir sur le long terme la qualité des ressources en eau souterraine rechargée, afin de garantir notamment que leur qualité soit compatible avec la production d'eaux destinées à la consommation humaine, sans recourir à des traitements supplémentaires dont le coût financier, matériel et humain serait difficilement supportable.

La Saisine insiste également sur la nécessité de mener des études de préfaisabilité complètes avant la mise en fonctionnement des infrastructures, afin de :

- Confirmer que leur fonctionnement permettra d'atteindre les objectifs initiaux de gestion de la ressource en eau, en accord avec les plans de sobriété et d'adaptation préalablement mis en place.
- Garantir un fonctionnement pérenne de l'infrastructure.

- Évaluer les impacts potentiels sur la gestion quantitative et qualitative de la ressource rechargée.
- Constituer les connaissances nécessaires à l'étude d'impact, notamment pour identifier les dangers pour l'Homme.
- Identifier les limites de connaissances empêchant d'atteindre les objectifs susmentionnés.

La Saisine précise que les eaux de recharge doivent respecter, au minimum, les limites suivantes :

- MES : < 10 $mg \cdot L^{-1}$.
- Turbidité : < 5 NFU.
- Carbone organique total (COT) : < 10 $mg \cdot L^{-1}$.

Elle rappelle également qu'il est nécessaire de démontrer l'absence d'augmentation durable et continue de tous les paramètres physico-chimiques, chimiques ou polluants susceptibles d'être introduits dans la ressource en eau rechargée par le dispositif d'infiltration. Pour ce faire, un programme de surveillance efficace doit être conçu afin de fournir les résultats permettant de constater cette absence de dégradation.

Plan Eau

La Mesure 22 du Plan eau mentionne explicitement la recharge maîtrisée des aquifères. L'objectif de cette mesure est d'élaborer un cadrage national et un guide méthodologique relatifs à la mise en place de systèmes de recharge maîtrisée des aquifères.

3ème Plan National d'Adaptation aux Changements Climatiques

Dans le 3e Plan national d'adaptation aux changements climatiques, une référence explicite à la Mesure 23 du Plan Eau est faite concernant « l'établissement d'exigences préalables pour l'eau infiltrée ou injectée, en vue de préserver la qualité de la ressource en eau rechargée, notamment pour la production d'eau destinée à la consommation humaine ».

CADRE Territorial

La compatibilité de l'expérimentation de recharge avec les schémas d'aménagement dans le domaine de l'eau est décrite dans le dossier de demande d'autorisation environnementale temporaire (pièce 7 étude d'incidence, chapitre § 5) déposée par RESEAU31 aux services de l'état. Notamment la commune de Cazères-sur-Garonne qui accueille le site expérimental est concernée par le SAGE « vallée de la Garonne ». Le SDAGE 2022-2027 définit Quatre orientations et priorités dont certaines sont directement ou indirectement liées au projet d'expérimentation.

Proposition de méthodologie pour évaluer l'impact de la qualité des eaux d'infiltration sur les eaux souterraines

Comme démontré dans la synthèse des textes réglementaires, l'obtention de l'autorisation de mise en fonctionnement des infrastructures conçues pour assurer la recharge maîtrisée des aquifères repose sur l'élaboration d'une analyse des risques et d'une évaluation environnementale permettant notamment de décrire les impacts potentiels de ces infrastructures sur la ressource rechargée, les milieux connectés et les risques pour l'Homme. Toutefois, il n'existe pas, à ce jour, de guides méthodologiques sur lesquels s'appuyer. En l'absence de tels guides, il est possible de se référer aux critères d'évaluation de l'état chimique des eaux souterraines et des eaux de surface tels que définis dans le cadre du Code de l'environnement.

Il est également nécessaire de se référer aux cadres réglementaires établis pour les eaux brutes destinées à la consommation humaine.

Les différents cadres législatifs et réglementaires, tant européens que nationaux, rappelés ci-dessus, mentionnent explicitement que la recharge maîtrisée d'aquifère ne doit pas préempter les usages actuels ou futurs de la ressource, notamment pour la production d'eau destinée à la consommation humaine. Il est également essentiel de prendre en compte les préconisations formulées par la Saisine de l'ANSES, au regard de l'expertise de cet organisme et de sa mission, qui consiste à évaluer les risques, à fournir aux autorités compétentes des informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique et techniques nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion des risques.

Au regard de la partialité des informations disponibles pour évaluer les impacts potentiels de l'infrastructure dédiée à la recharge maîtrisée d'aquifère, une approche préliminaire et simplifiée d'analyse des données disponibles sur la qualité des eaux de recharge et des eaux de la nappe est à proposer. Cette approche repose sur la comparaison des données disponibles avec les valeurs de référence définies dans les différents cadres réglementaires, ainsi que sur une comparaison entre les eaux utilisées pour la recharge et les eaux à recharger.

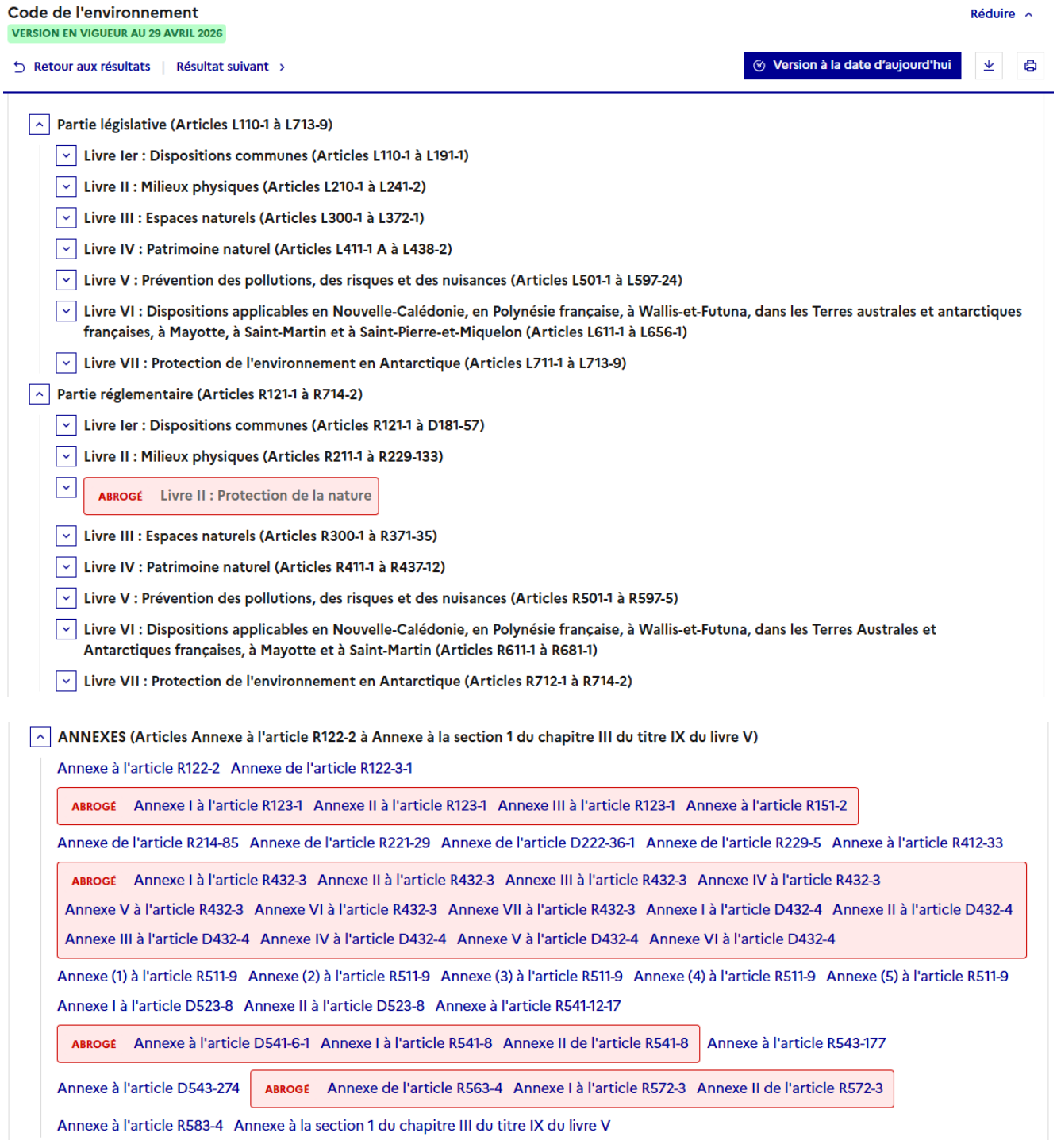
Cette approche se détaille comme suit :

Pour les paramètres physico-chimiques listés dans la saisine de l'ANSES (turbidité, MES, teneur en carbone) : comparer les mesures réalisées lors de campagne avec des données disponibles dans les bases de données dédiées (NAIADES, ADES).

Pour les éléments chimiques mentionnés dans le cadre de la surveillance des ESU et ESO (liste de surveillance, liste de surveillance renforcée, campagne photographique) et pour lesquels une valeur seuil ou équivalente est définie : comparer les mesures de concentration disponibles à ces seuils. Ce travail est à réaliser sur les données issues de campagne ainsi que sur les données disponibles dans les bases de données dédiées (NAIADES, ADES).

Pour les paramètres chimiques et les polluants mesurés et quantifiés simultanément dans les ESU et les ESO : peut-être effectuer une comparaison des concentrations mesurées afin de déterminer si un possible transfert de ces éléments des ESU vers l'ESO peut survenir, et si ce transfert pourrait entraîner une dégradation potentielle de la nappe.

C/ Organisation du code de l'environnement



Annexe 3 Des outils utiles à la mise en place et au suivi d'un site de recharge maîtrisée des aquifères

Hydrogéologie et hydrogéochimie

La mise en place d'un dispositif de recharge maîtrisée des aquifères repose sur une connaissance approfondie et multi-échelle de l'hydrosystème, depuis l'échelle du bassin versant jusqu'à l'échelle locale du dispositif. Cette connaissance s'appuie sur un ensemble d'investigations hydrogéologiques visant à caractériser le fonctionnement du système aquifère, ses interactions avec les eaux de surface et les pressions anthropiques. Elle mobilise des outils et méthodes variés, incluant notamment les forages de reconnaissance géologique et les mesures associées, les méthodes géophysiques, l'installation de piézomètres, ainsi que la réalisation d'essais variés. Ces investigations sont complétées par des analyses physico-chimiques et isotopiques des eaux, des analyses minéralogiques des formations géologiques, ainsi qu'une analyse croisée des données environnementales disponibles. L'ensemble de ces données doit être structuré et valorisé dans une logique de suivi à long terme, à travers la mise en place de dispositifs de monitoring adaptés et l'intégration dans des systèmes d'information dédiés à l'eau (tels que les bases nationales BSS, ADES, NAIADES et européennes).

Pour l'évaluation hydrogéologique d'un site il est nécessaire de caractériser :

- L'aquifère et les eaux souterraines : type d'aquifère, extension spatiale, composition minéralogique de la roche, épaisseur de la zone saturée, coefficient d'emmagasinement, conditions aux limites hydrogéologiques délimitant la masse d'eau considérée. En effet, les conditions aux limites influent directement sur la circulation de l'eau par le biais du gradient hydraulique. Le type d'aquifère, confiné ou non, et le caractère libre ou captif de la nappe d'eau souterraine conditionnent à la fois les modalités de recharge naturelle ainsi que les volumes mobilisables et le type de dispositif de recharge pour la recharge maîtrisée des aquifères.
- Selon les cas, la caractérisation de la zone non saturée (ZNS) est nécessaire : sa perméabilité, son épaisseur. Le paramètre essentiel étant la conductivité hydraulique, dans la mesure où elle contrôle la vitesse de percolation de l'eau infiltrée.

L'instrumentation de suivi hydrogéologique et biogéochimique qui est mis en place pour assurer le suivi du comportement de la nappe d'eau souterraine, repose principalement sur des piézomètres d'observation, permettant de mesurer les niveaux d'eau, la conductivité hydraulique et d'échantillonner les eaux pour analyse in situ ou au laboratoire nécessaire à l'identification de la situation de référence avant, pendant et après la recharge. La mise en place des piézomètres doit s'accompagner de caractérisations des roches et servir à préciser le modèle géologique. L'instrumentation et le suivi des eaux et écoulements sont également à mettre en place pour évaluer les eaux utilisées pour la recharge ainsi que les eaux de surface en connexion avec le système de recharge maîtrisée des aquifères. De nombreuses techniques d'instrumentation et de suivi sont en cours de développement et doivent être étudiées (imagerie et suivi satellitaire, sondes et capteurs en continue et en ligne, échantillonneurs ou capteurs passifs, méthodes d'analyses ciblées et non ciblées, essai biologique, etc.).

Les expérimentations in situ telles que pompage d'essai, essai de nappe, essai d'injection, essai d'infiltration, essai de traçage en conditions expérimentales combinées ou non et en conditions opérationnelles sont à déployer et à interpréter pour préciser les caractéristiques d'écoulements, de transport et de réaction biogéochimiques.

Le suivi de la zone non saturée dans le cas des dispositifs de recharge maîtrisée des aquifères indirectes par infiltration, peut s'effectuer par des instruments spécifiques tels que les bougies poreuses, les tensiomètres et les sondes TDR (Time Domain Reflectometry) sont utilisés pour caractériser respectivement la qualité de l'eau porale, la succion et la teneur en eau du sol. Ces mesures permettent d'appréhender les évolutions de conductivité hydraulique, stockage et de réactivité biogéochimique, et en conséquence les capacités de stockage, les temps de résidence de l'eau et l'épuration naturelle ayant lieu dans la zone non saturée.

Cartographie

Les méthodes cartographiques pour la sélection de sites favorables à la recharge maîtrisée des aquifères reposent principalement sur des analyses spatiales multicritères réalisées sous SIG (système d'information géographique) (Rahman *et al.*, 2012; Russo *et al.*, 2015; Maréchal *et al.*, 2019; Sallwey *et al.*, 2019). Elles consistent à intégrer et croiser des données de surface et de subsurface (pente, perméabilité, épaisseur de la zone non saturée, occupation du sol, etc.) à une résolution adaptée. Chaque critère est classifié puis pondéré selon son importance relative pour la recharge. La pondération est fréquemment réalisée via le processus d'analyse hiérarchique (AHP), reconnu pour sa robustesse en aide à la décision spatiale (Rahman *et al.*, 2012). Les critères pondérés sont ensuite combinés pour produire des cartes de faisabilité de la recharge (Maréchal *et al.*, 2019). La carte de faisabilité finale doit être validée par une analyse de sensibilité. Les valeurs et pondérations des critères constituant les principales sources d'incertitudes dans le processus d'analyse décisionnelle multicritère, la réalisation d'une analyse de sensibilité permet de prendre des décisions plus fiables. Cette analyse sert à mettre en évidence l'effet de différentes pondérations des critères sur la configuration spatiale de la carte de faisabilité (Sallwey *et al.*, 2019). La disponibilité des données influence fortement le choix des critères. Par ailleurs, les critères utilisés pour une analyse spatiale multicritère sur un territoire donné ne sauraient être reproduits à l'identique sur un autre territoire, chaque contexte territorial présentant des spécificités qui nécessitent de réévaluer la sélection et la pondération des critères. Le couplage des études SIG et de la modélisation hydrogéologique est utile pour garantir la cohérence internes des données utilisées et pour que les résultats de chacune puissent alimenter l'autre et de maximiser le les bénéfices de compiler et traiter de larges ensembles de données spatiales et temporelles(Russo *et al.*, 2015). Les analyses spatiales multicritères sont à mettre en œuvre en phase d'étude de préfaisabilité, et permettent d'évaluer le projet de dispositif dans une gestion intégrée.

Monitoring

Afin d'évaluer correctement si le dispositif de recharge atteint ses objectifs mais également pour suivre son évolution, un monitoring précis du système est indispensable à établir. Ce monitoring implique de suivre, d'une part, l'hydrodynamique et les propriétés hydrogéologiques du site de recharge artificielle telles que la perméabilité et, d'autre part, les propriétés chimiques et microbiologiques telles que la teneur en métaux traces ou en micro-organismes pathogènes. Ce suivi est d'autant plus important à réaliser dans le cas d'un arrêt temporaire ou définitif de la recharge artificielle car une remobilisation des contaminants peut survenir dans ces conditions (Casanova *et al.*, 2013). Nombreux sont les systèmes de recharge maîtrisée des aquifères permettant de répondre aussi à des problématiques de qualité d'eau voire, dans le cas des SAT, de faire face aux risques de pollution par certains micropolluants non réglementés. Des technologies innovantes combinées aux systèmes de recharge maîtrisée des aquifères peuvent être déployées afin d'optimiser les effets bénéfiques de cette recharge dans le contexte réglementaire local en passant par un monitoring spécifique et des outils de modélisation adaptés.

Géochimie et microbiologie

Dans le cadre de la conception et du suivi d'un dispositif de recharge maîtrisée des aquifères, une caractérisation physico-chimique et microbiologique des eaux de recharge et de la nappe est indispensable. Les paramètres physico-chimiques mesurés incluent les variables classiques des eaux telles que le pH, le potentiel redox, la température, la conductivité, la teneur en matière organique en suspension, la conductance spécifique, la résistivité, la salinité et la teneur en d'oxygène dissous, généralement suivies à partir de sondes physicochimiques reliées à une centrale d'acquisition. Ces mesures sont complétées par des analyses plus approfondies des eaux de recharge portant sur les ions majeurs (anions et cations), les métaux traces et métalloïdes (Al, ainsi que la matière organique (COT, COD) et divers contaminants organiques (hydrocarbures aromatiques polycycliques, pesticides, polychlorobiphényles, dioxines et furanes, dérivés de détergent et de plastifiants, d'hormones naturelles et synthétiques et de produits pharmaceutiques).

Lors de la conceptualisation du dispositif de recharge, ces analyses physico-chimiques permettent de déterminer les contaminants et les micro-organismes pathogènes susceptibles de contaminer la nappe et qui devront être suivi lors de l'activité de recharge. Elles sont complétées par des analyses minéralogiques (rayons X et fluorescence X) réalisées sur les carottes issues des forages d'exploitation afin de déterminer les composés chimiques pouvant être libérés par les processus de désorption ou de dissolution. Cette étape de sélection permet de réduire le nombre de paramètres physico-chimiques et microbiologiques à mesurer pour caractériser la qualité des eaux de recharge et celles de la nappe lors de l'utilisation du dispositif de recharge. Il est important de souligner que les paramètres physico-chimiques et microbiologiques retenus sont dépendants du type d'eau de recharge utilisée et des propriétés physicochimiques du site de recharge. Ces propriétés sont donc susceptibles de varier d'un site à un autre.

La caractérisation microbiologique des eaux de recharge et de celles de la nappe repose quant à elle sur le dénombrement de la microflore totale, la mesure de la biodiversité totale et l'identification de micro-organismes d'intérêt par des approches moléculaires. Le suivi du ratio entre micro-organismes totaux et micro-organismes pathogènes constitue également un indicateur clé de la qualité sanitaire.

Dans le cas spécifique des dispositifs de recharge maîtrisée des aquifères par infiltration, des analyses peuvent également être réalisées sur les eaux porales contenues dans la zone non saturée. Pour ce faire, l'eau porale est extraite à l'aide de bougie poreuse dont la pression interne peut être modifiée afin de prélever de l'eau, y compris dans les milieux fortement non saturés. Toutefois, la fréquence de ces mesures peut être limitée par les volumes d'eau mobilisables, dépendant de la teneur en eau du milieu.

Socio-économie

Des méthodes socio-économiques sont à appliquer pour organiser les réflexions des différents acteurs du territoire de manière à établir :

- La conception et l'exploitation du système sur le plan hydrogéologique et technique afin d'obtenir des avantages supérieurs aux coûts.
- La conformité du système aux réglementations, dans le cadre d'un régime réglementaire progressif.
- L'établissement de mécanismes de consultation appropriés pour permettre des négociations satisfaisantes entre les parties prenantes.

Dans les systèmes où la gestion de la demande est en place, les investissements publics et privés servent à développer l'approvisionnement en eau, et les investissements publics à renforcer la sécurité de l'approvisionnement en eau.

Le coût global d'un système de recharge maîtrisée des aquifères comprend les coûts d'investissements et les coûts opérationnels (de fonctionnement et de maintenance). Les coûts d'investissement sont ponctuels alors que les coûts opérationnels sont récurrents tout au long de la durée de vie du système. De plus l'évaluation des co-bénéfices associés aux systèmes de recharge maîtrisée des aquifères devraient être mis en avant et inclus dans le modèle économique présentant les avantages économiques du projet.

Les coûts d'investissement recouvrent les études préalables, l'acquisition du terrain, l'infrastructure d'adduction de l'eau, les unités de traitement des eaux de recharge, la conception et la réalisation du dispositif de recharge, et autres appareillages de contrôle et travaux annexes. Ces coûts d'investissement sont détaillés par Caballero et al. (2018) sur la base d'une synthèse bibliographique. Sont indiqués des coûts (n'incluant pas le poste d'acquisition des terrains) de l'ordre de 0.76 à 1.36 €/m^3 d'eau stockée par le système de recharge par bassin d'infiltration et de 2.72 à 6.80 €/m^3 d'eau stockée par le système d'injection par forage.

Les coûts opérationnels recouvrent les dépenses d'exploitation et de maintenance du système de recharge maîtrisée d'aquifère. Ces charges annuelles et récurrentes regroupent : le prétraitement (entretien, curage cuves, produits chimiques, …), la maintenance (curage bassin, pompes, …), la consommation d'énergie, la surveillance de la qualité de l'eau et des appareillages, et autres charges annexes (achat d'eau de recharge, redevances et taxes, gestion administrative, personnels, emprunts, assurances, …). Ces coûts opérationnels sont assez différents selon la technique de recharge et l'eau de recharge utilisée. En effet, entre les systèmes d'infiltration par bassin et ceux d'injection par forage, les techniques de décolmatage sont plus coûteuses dans le cas d'injection par forage. Par ailleurs, les systèmes utilisant des eaux usées traitées seront plus coûteuses.

(Ross *et al.*, 2018) proposent une comparaison des coûts d'investissement et des coûts opérationnels entre les deux types de recharge maîtrisée des aquifères (par bassin d'infiltration et par forage d'injection) combinant deux types d'eau de recharge (eaux usées traitées et eau naturelle) présenté sur le tableau ci-dessous. Les coûts sont nettement plus élevés pour les systèmes utilisant des eaux usées traitées et les systèmes d'injection par forage demandent des coûts d'investissements plus importants que les systèmes par bassin d'infiltration. Le coût global est identique entre les deux techniques utilisant des eaux usées traitées par une différence des coûts opérationnels entre les deux techniques de recharge maîtrisée des aquifères.

MAR Scheme/ Water Source (projects per scheme)	Capital Cost/ m^3 Recharge Water	O&M Cost/m^3 Recharged Water	Levelized Cost/m^3 Recharged Water
Recharge wells/recycled water (5)	*$10.33*	*$0.65*	*$1.46*
Infiltration basins/recycled water (2)	*$7.44*	*$0.92*	*$1.50*
Recharge wells/natural water (5)	*$3.29*	*$0.19*	*$0.45*
Infiltration basins/natural water (8)[10]	*$0.77*	*$0.13*	*$0.19*

Table 1: Average MAR Scheme Costs (Ross & Adnain, 2018)

Comparaison des coûts entre différents systèmes de recharge maîtrisée des aquifères (Ross and Adnain, 2018)

Il est alors important de définir une politique de maintenance qualitative et quantitative pour en déduire les conséquences sur l'entretien, dont les incidences financières pèsent sur la rentabilité de l'exploitation.

Par ailleurs, la comparaison des coûts d'un projet de recharge maîtrisée des aquifères à ceux d'autres solutions alternatives de mobilisation de la ressource (stockage superficiel de l'eau, désalinisation, …) participe à l'évaluation de la faisabilité de la mise en place du système.

Dans Zheng *et al.* (2021) 28 cas de recharge maîtrisée des aquifères sont étudiés, chacun d'entre eux a été évalué en termes de durabilité environnementale et sociale à l'aide d'une technique qualitative de base spécialement développée pour cette étude afin d'analyser plus en détail leurs atouts et leur viabilité. De plus, les cas ont fait l'objet d'une analyse coûts-avantages afin de comprendre leurs avantages économiques relatifs et leurs coûts par rapport à des solutions alternatives. Trois des neuf indicateurs de durabilité évalués concernent des facteurs échappant au contrôle des responsables de la mise en œuvre des projets ayant présenté ces cas. Bien qu'ils aient clairement été mis en place dans certains cas, leurs lacunes dans un certain nombre d'autres cas suggèrent que la durabilité des systèmes de recharge maîtrisée des aquifères, ainsi que les ressources en eaux souterraines ou les approvisionnements en eau potable auxquels elle contribue, seraient renforcées si des plans d'allocation des eaux souterraines et des politiques de protection de la qualité des eaux souterraines étaient mis en œuvre, et si des capacités de surveillance de la qualité des eaux souterraines et des procédures de consultation publique étaient établies.

Modélisation

La modélisation constitue un outil central dans l'évaluation, la conception et la gestion des dispositifs de recharge maîtrisée des aquifères. Elle permet d'intégrer les connaissances acquises lors des investigations hydrogéologiques, de tester des scenarios de fonctionnement et d'anticiper les impacts quantitatifs et qualitatifs a différentes échelles spatiales et temporelles.

Conformément aux exigences de la directive-cadre sur l'eau (DCE), notamment son article 5, le recours à des outils de modélisation est recommandé pour appuyer l'analyse de l'état et des tendances de l'aquifère. Les documents d'orientation élaborés dans le cadre de la stratégie commune de mise en œuvre (CIS) fournissent un cadre méthodologique pour le développement et l'utilisation de ces outils, en particulier pour la définition des programmes de surveillance et l'évaluation du bon état des eaux souterraines (EC 2007a, EC 2007b, EC 2009).

- Modélisation hydrogéologique

Les modèles analytiques peuvent servir à une évaluation préliminaire des possibilités offertes par la recharge maîtrisée des aquifères. Une telle évaluation serait utile pour le choix de l'emplacement et la conception des structures de recharge, l'évaluation de la remontée des eaux souterraines, l'estimation du volume d'eau pouvant être stocké et, enfin, l'évaluation de l'impact de la recharge maîtrisée des aquifères sur les cours d'eau voisins (Dewandel *et al.*, 2021).

Les modèles numériques hydrogéologiques permettent de prévisualiser la faisabilité du dispositif de recharge maîtrisée des aquifères dans un contexte régional, d'optimiser le choix du site, la configuration d'un système approprié pour la récupération de l'eau rechargée, et d'optimiser les conditions opérationnelles de manière à atteindre les objectifs quantitatifs et qualitatifs (Kloppmann *et al.*, 2012).Les modèles numériques ou analytiques sont basés sur un modèle conceptuel du système hydrogéologique. Ce modèle conceptuel est élaboré à partir de l'état des connaissances disponibles et intègre les données existantes ainsi que les hypothèses de fonctionnement. Les hypothèses de fonctionnement sont ensuite testées dans des modèles analytiques et/ou numériques et les paramètres des modèles calibrés en s'appuyant sur les données observées sur le terrain et étayant les modèles conceptuels auxquels ils se réfèrent. Les modèles numériques sont de puissants outils pouvant simuler de nombreux scénarios construits pour évaluer les bénéfices et les risques dans différentes situations plus ou moins long terme.

- Modélisation hydro(bio)géochimique

La modélisation hydro(bio)géochimique vise à simuler l'évolution de la qualité des eaux infiltrées lors de leur transfert dans le sous-sol et leurs interactions avec le milieu géologique. Elle repose sur le couplage des processus de transport (advection, dispersion, diffusion) et des réactions physico-chimiques et biologiques (réactions redox, dissolution/précipitation, échanges ioniques, activité microbienne) qui peuvent être fortement modifiés par l'introduction d'eaux de recharge de composition ou température différentes de celle de la nappe (Kloppmann *et al.*, 2012). Ces approches permettent d'anticiper les changements de la qualité de l'eau au cours de l'infiltration et du stockage, d'évaluer les risques de mobilisation ou d'atténuation de contaminants (par exemples métaux, nutriments ou micropolluants), ainsi que les phénomènes de colmatage liés à des réactions géochimiques ou biologiques. La modélisation fine des processus de transport réactif constitue ainsi un outil d'aide à la décision pour le dimensionnement des dispositifs de recharge maîtrisée des aquifères, le choix des conditions d'exploitation et l'évaluation de leur compatibilité avec les objectifs de qualité des eaux souterraines à court et long terme.

Sites opérationnels

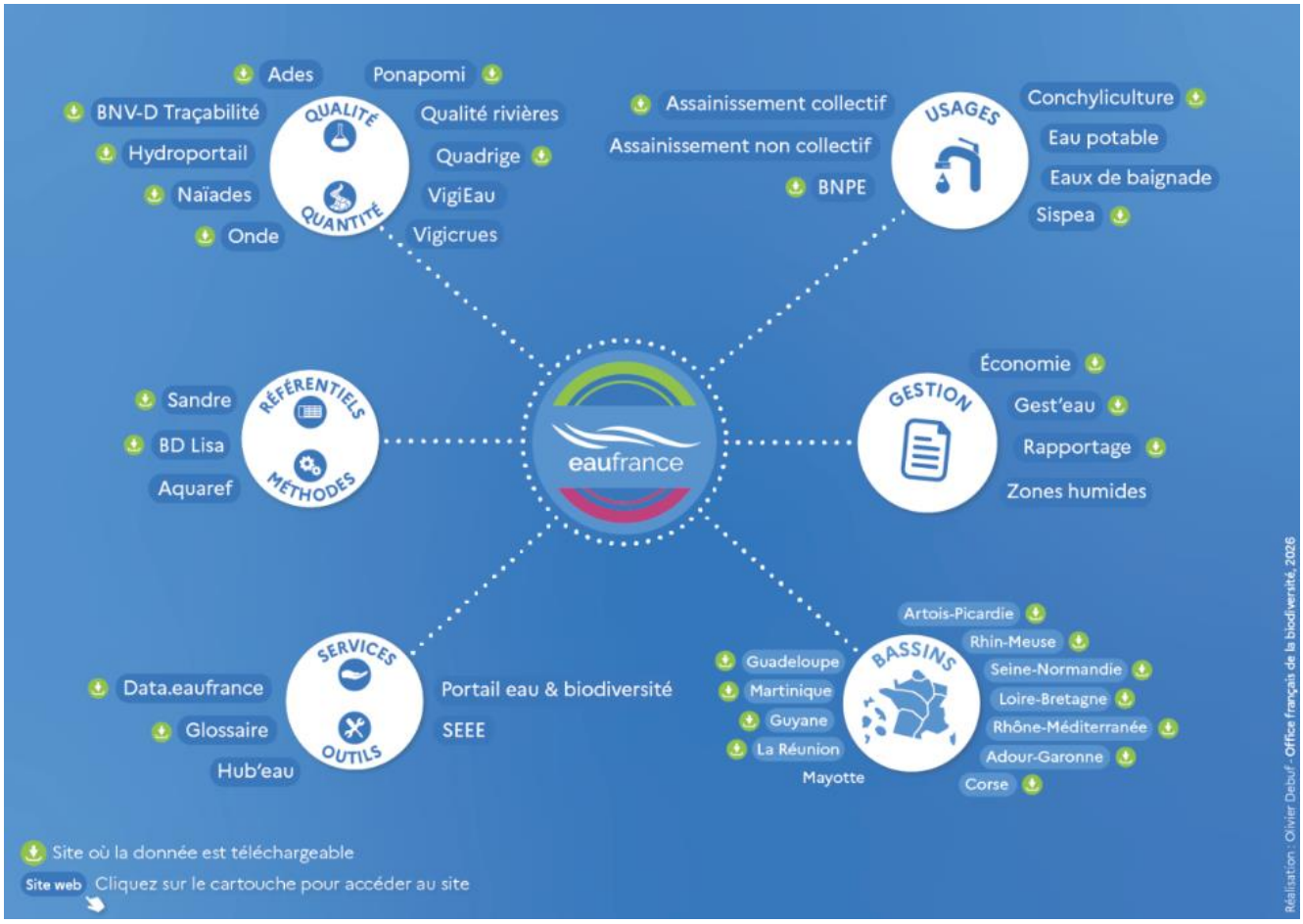
Les études de cas constituent un moyen d'apprentissage concis et pratique, non seulement sur ce qui a été réalisé au niveau local, mais aussi sur le comment et le pourquoi dans le contexte de la situation préexistante, ainsi que sur les conséquences de l'intervention. Zheng *et al.* (2021) présentent 28 exemples concrets et variés de recharge maîtrisée des aquifères pérennes à travers le monde, documentés par les personnes directement impliquées dans leur mise en œuvre afin de donner aux lecteurs un aperçu. Pour ces 28 cas, du niveau du village à celui de

l'État, des personnes ont collaboré de manière concertée pour gérer leurs ressources en eau afin d'améliorer la quantité et la qualité de l'approvisionnement, tout en se prémunissant contre la sécheresse et les situations d'urgence. Ces cas montrent qu'il n'est pas nécessaire d'avoir des précédents ; ils sont présentés pour inspirer les dirigeants et rassurer les citoyens en leur montrant que les personnes sur le terrain qui acquièrent une bonne compréhension de leurs eaux souterraines peuvent s'adapter et concevoir des solutions viables pour répondre durablement à leurs besoins. Les bénévoles qui ont fourni ces études de cas ont permis une évaluation cohérente de la durabilité et des avantages économiques.

IGRAC - MAR Portal : Le portail « MAR Portal » est une plateforme en ligne développée par l'International Groundwater Resources Assessment Centre (IGRAC ; Stefan *et al.* (2018)), dédiée à la centralisation et diffusion des connaissances sur la recharge maîtrisée des aquifères. La plateforme regroupe 1200 études de cas provenant de plus de 50 pays, issues de sources de données ouvertes (publications scientifiques, rapports techniques). La plateforme facilite l'échange d'informations entre chercheurs, gestionnaires de l'eau, décideurs publics et praticiens. De plus, elle soutient la planification et la mise en œuvre de projets de recharge maîtrisée des aquifères en s'appuyant sur des retours d'expérience concrets.

Plateformes et espaces de partages des connaissances

Le service public d'information sur l'eau et les milieux aquatiques, « eaufrance » - https://www.eaufrance.fr/ - est le portail du Système d'information sur l'eau (SI Eau). Il a pour but de faciliter l'accès à l'information publique et aux données sur le domaine de l'eau en France. Les données proviennent de mesures réalisées dans les cours d'eau ou plans d'eau, les nappes d'eau souterraine et les eaux littorales (eaux côtières et de transition). Les mesures sont réalisées par des organismes spécialistes de ces environnements, tels que l'Ifremer pour les eaux littorales, le BRGM pour les eaux souterraines, les agences de l'eau qui surveillent la qualité des eaux de leurs bassins et perçoivent des redevances sur les quantités d'eau consommées, l'Office français de la biodiversité pour la surveillance des espèces et l'hydromorphologie, et d'autres acteurs comme les services déconcentrés de l'État, les collectivités, des associations, des chercheurs, des bureaux d'études... La Direction de l'eau et de la biodiversité (DEB) du ministère en charge de l'environnement assure la coordination interministérielle du SI Eau et l'Office français de la biodiversité (OFB), sous l'autorité du ministère, en exerce la coordination technique. La toile eaufrance propose un ensemble de sites spécialisés qui sont listés en détail sur la figure ci-dessous et concernent les données « eau » relatives à : la qualité et la quantité (ADES, NAIADES, Hydroportail, ONDE, VIGIEAU, VIGICRUES, …), aux usages (assainissement, BNPE, eau potable, eaux en zones conchylicoles, eaux de baignades, …), aux référentiels et méthodes (AQUAREF, BD Lisa, SANDRE), à la gestion (Economie, rapports et données d'état des eaux DCE, GEST'EAU, Zones humides), aux services et outils (Data eaufrance, Glossaire, Hub'Eau, portail Eau&Biodiversité, SEEE) et aux bassins.



INOWAS : Les éléments décrits précédemment (caractérisation hydrogéologique, monitoring, processus géochimiques et microbiologiques) constituent les bases indispensables à la conception et à la gestion d'un site de recharge maîtrisée des aquifères. Dans la pratique, et afin d'opérationnaliser ces approches, des outils d'aide à la décision ont été développés pour accompagner les différentes étapes d'un projet de recharge maîtrisée des aquifères. Par exemple, la plateforme INOWAS (Glass *et al.*, 2022) propose une suite d'outils qui couvrent les principales étapes d'un projet de recharge maîtrisée des aquifères, depuis la sélection du site jusqu'à la modélisation et la gestion opérationnelle. Les différents outils proposés par cette plateforme sont présentés en Annexe 4. La plateforme inclut notamment des modules de modélisation numérique des écoulements souterrains (MODFLOW) et du transport de solutés, permettant d'analyser à la fois les aspects hydrodynamiques et la qualité de l'eau. Des outils d'analyse de scenarios facilitent la comparaison de différentes stratégies de gestion ou l'intégration de changements environnementaux. Par ailleurs, des fonctionnalités de suivi et d'intégration des données en temps réel permettent d'adapter les modèles aux observations de terrain. La plateforme intègre également des outils d'aide à la décision, comme les analyses multicritères pour la sélection de sites ou le choix des techniques de recharge. Enfin, des modules analytiques simplifiés permettent d'obtenir rapidement des estimations préliminaires (temps de transit, montée de nappe, intrusion saline), utiles en phase de prédimensionnement.

D'autres plateformes, supports d'aide à la décision et applications web ou API sont également développées et appliquer aux systèmes de recharge maîtrisée des aquifères et diffuser comme résultats d'actions de recherche et innovation ou recherche et développement. C'est le cas des services issus du projet AQUANES (programme européen H2020) dont les outils des technologies de l'information et de la communication (ICT – Information Communication Tool)

qui en phase d'exploitation des systèmes de recharge maîtrisée peuvent aider à contrôler et optimiser les opérations en combinant les données de surveillance (en ligne ou non) et les résultats de modélisation. Des supports d'aide à la décision (ou Decision Support System – DSS) sont issus des projets AQUANES, SMART-CONTROL associé à INOWAS ou FRAME (Programme JPI-Water – cf Annexe 4), MARSOLUT, SALAM-MED (projet européen PRIMA), MARCLAIMED, MAR2PROTECT, DEMEAU, etc.

Etudes R&D

Les études de R&D jouent un rôle clé dans la conception et mise en œuvre des dispositifs de recharge maîtrisée des aquifères en réduisant les incertitudes techniques et en testant des solutions innovantes. Elles contribuent à lever les verrous scientifiques, techniques, économiques et réglementaires. Les études de R&D peuvent être mises en place via des financements ou co-financements de projets, ou par la mise à disposition de sites pilotes servant de cas d'étude à différentes échelles. Enfin, elles sécurisent et accélèrent un transfert de connaissance entre recherche et opérationnel. Les dispositifs de soutien aux entreprises, comme les conventions CIFRE (via l'ANRT), facilitent l'intégration de doctorants travaillant sur des problématiques appliquées liées à la recharge maîtrisée des aquifères. Le crédit d'impôt recherche (CIR) constitue un levier financier important pour encourager les entreprises à investir dans la recherche appliquée, le développement expérimental et l'innovation. Ces aides permettent notamment de financer des prototypes ou des installations pilotes de recharge.

Associations et groupes d'experts

Au-delà des institutions publiques et services de l'état (DDTM, DREAL, ARS, ANSES, BRGM, INRAE, METEOFRANCE, AGENCES DE L'EAU, etc.) de nombreux acteurs et experts peuvent être sollicités à travers différentes associations et groupes d'experts scientifiques et techniques s'intéressant aux systèmes de recharge maîtrisée des aquifères, à la gestion des ressources en eau ou aux solutions d'adaptation au changement climatique plus en général.

- Le Comité Français d'Hydrogéologie (CFH) et la commission « Managed Aquifer Recharge » de l'Association internationale des Hydrogéologues (AIH)

L'Association internationale des hydrogéologues (AIH) a créé une commission sur la recharge maîtrisée des aquifères afin d'étudier les techniques émergentes et prometteuses de gestion de l'eau, fondées sur des données scientifiques solides, et d'informer les planificateurs, les responsables de la mise en œuvre et les régulateurs, de manière que les projets visant à améliorer la recharge soient durables et aient un impact réel sur ces défis. Dans le cadre de l'une de ses nombreuses initiatives, le Programme hydrologique intergouvernemental de l'UNESCO a organisé à Paris, les 25 et 26 avril 2002, une réunion des dirigeants d'organisations mondiales sur le thème de la recharge maîtrisée des aquifères. De cette réunion est née l'intention stratégique commune de coordonner les progrès sur ce sujet par l'intermédiaire de la Commission de l'AIH. Cela est resté depuis lors un axe central d'activité et de collaboration, notamment à travers une série de groupes de travail visant à faire progresser les connaissances et leur diffusion sur les aspects techniques, de gouvernance, économiques et de durabilité de la recharge maîtrisée des aquifères.

- Partenariat Français pour l'Eau (FPE)

Le Partenariat français pour l'eau (PFE), est la plateforme de référence des acteurs français de l'eau publics, privés et associatifs, actifs à l'international. Il porte un plaidoyer au niveau international pour améliorer la prise en compte des enjeux liés à l'eau dans les différentes actions et politiques et favorise les échanges entre les savoir-faire français et ceux des autres pays. Le

PFE rassemblant les acteurs publics et privés de l'eau, vise à faire connaitre et à promouvoir sur le plan international l'approche et l'expertise française en matière de gestion de l'eau : une approche particulière car résolument multi-acteurs, et toujours innovante.

- ASTEE – L'association des professionnels de l'eau et des déchets

L'ASTEE mène via la commission « assainissement » joue un rôle dans la gestion des systèmes d'assainissement : services publics et privés, représentants des administrations et entreprises concernées ainsi que les spécialistes des différentes activités en rapport avec la collecte, le traitement et les rejets aux milieux récepteurs des eaux usées. Les différents acteurs impliqués confrontent leurs positions et recherchent des compromis sur des sujets techniques et réglementaires. Via un groupe de travail dédié, l'ASTEE produit en 2023 un guide[30] (favoriser le recours aux eaux non conventionnelles) qui, au-delà de la réutilisation des eaux usées traitées (REUT), traite des différentes ENC et leurs utilisations possibles. Les progrès réalisés dans les méthodes de traitement améliorent la qualité de l'eau recyclée et réduisent les coûts, créant ainsi de nouvelles opportunités pour la recharge maîtrisée des aquifères d'améliorer et de sécuriser l'approvisionnement en eau grâce à une eau qui, autrement, serait gaspillée ou polluerait les cours d'eau, les aquifères et les estuaires.

L'ASTEE travaille également à repenser la gestion intégrée et durable des eaux pluviales qui est au carrefour des transitions environnementales et met en place en avril 2025 une commission pour passer à l'action afin de mieux répondre aux enjeux d'aménagement du territoire, de transition écologique, de vulnérabilité des milieux, de biodiversité et de services écosystémiques (défis actuels sont notamment liés : au dérèglement climatique accompagné d'un changement des régimes des pluies ; à la nécessité de retourner l'eau pluviale à la parcelle pour recharger les nappes et maintenir les étiages des cours d'eau ; au besoin d'adapter les territoires au changement climatique ; au besoin d'améliorer le cadre de vie des habitants par un verdissement de l'espace ; à la nécessité de lutter contre l'érosion de la biodiversité et de la développer). Plusieurs groupes de travail sont créés ayant pour objectif de répondre aux enjeux actuels en apportant des outils méthodologiques et techniques aux professionnels du secteur, et de faciliter l'application des nouveaux cadres réglementaires.

- Cercle Français sur l'Eau (CFE)

Le Cercle Français sur l'Eau est un lieu d'échanges, de diversité de positions, de réflexion privilégiée entre les parlementaires, les associations d'élus, les acteurs économiques et les organismes de recherche, pour orienter les politiques publiques vers une gestion de l'eau efficace, intégrée et durable en France et en Europe. Il collabore activement avec les institutions publiques, les collectivités territoriales et tout acteur institutionnel par la proposition de solutions concrètes, et contribue ainsi à l'intérêt général et au développement des politiques publiques en lien avec l'eau. C'est une force active de propositions pour l'élaboration des lois relatives à l'eau et aux milieux aquatiques qui mène des actions d'information, de sensibilisation et de mobilisation sur les grands enjeux de l'eau et de l'environnement.

Formations

Plusieurs formations permettent aujourd'hui d'acquérir des compétences spécifiques en recharge maitrisée des aquifères. En France, le BRGM propose une formation dédiée aux principes, techniques et enjeux de la recharge maitrisée des aquifères. Cette formation s'adresse aux

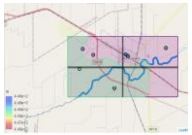
[30] https://www.astee.org/publications/favoriser-le-recours-aux-eaux-non-conventionnelles/

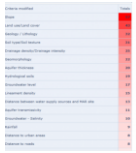
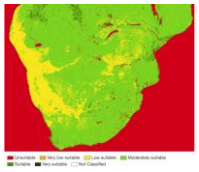
décisionnaires, gestionnaires et professionnels des secteurs de l'eau, de l'assainissement et de l'aménagement. https://formation.brgm.fr/solutions/stage.php?folid=26&stageid=157&search=9

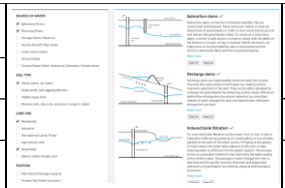
A l'international, l'université d'été « MARISS International Summer School "Managed Aquifer Recharge") de la HTW Dresden (Allemagne) constitue une référence pour les étudiants et professionnels de l'eau. Cette université d'été aborde les aspects hydrauliques, la conception des ouvrages, la modélisation numérique, la qualité de l'eau et les cadres règlementaires en combinant cours théoriques, travaux pratiques et visites de terrain. https://www.htw-dresden.de/en/university/faculties/civil-engineering/studies/subject-areas/water-sciences/research/planned-research-topics

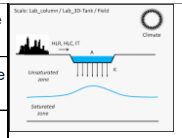
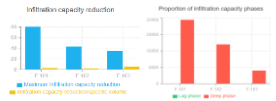
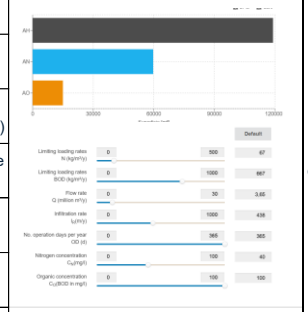
Annexe 4 Synthèse d'outils accessibles et partagés utiles à la préfaisabilité et au prédimensionnement

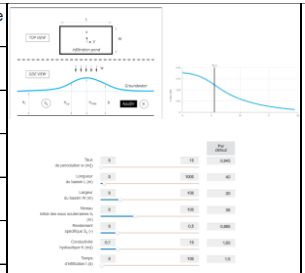
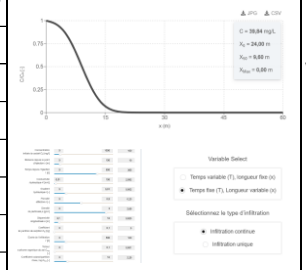
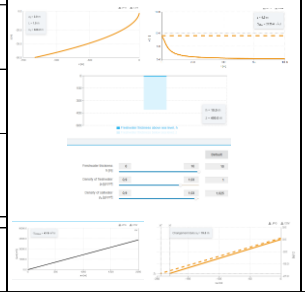
Par un tableau et fiches synthétiques, sont présentés à titre informatif et de manière non exhaustive des outils utiles communiqués, appliqués à des cas concrets et accessibles via la plateforme INOWAS, le site internet du BRGM ou par demande (OUAIP, TRAC, MARTHE, Solutions analytique et semi-analytique), les sites de projets de recherche européen (ici FRAME DSS – « Virtual removal assessment), etc. qui aident à la préfaisabilité, faisabilité, dimensionnement des projet de recharge maîtrisée des aquifères.

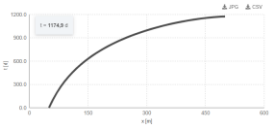
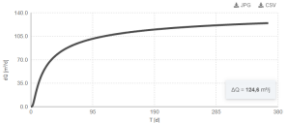
Outils		Objectifs/Applications RMA	Échelle	Paramètres / Données	Résultats attendus	Avantages	Limites	Références (lien)	Plateforme site web
Modélisation	T03 - Modélisation Numérique des eaux souterraines et optimisation Modflow-2005	Résolution Numérique de l'équation de Darcy	Locale	hydrauliques (k,n,T,S)	carte piezométrique, bilan hydrique  	Représentation 3D réaliste ; Multicouche,scénarios multiples, gère l'hétérogeneité	besoins massif de données, unité et temps et de longueurs spécifiques, calcul lent	Bakker, M.et al (2016) http://dx.doi.org/10.1111/gwat.12413	INOWAS
				conditions aux limites (Dirichlet, Neumann,Cauchy)				Darcy, H., 1856.	
				Géométrie (spatiale et temporelle)				Harbaugh, A.W., 2005. https://pubs.usgs.gov/tm/2005/tm6A16/	
				Modèle conceptuel				Hesch, W., Chmakov, S., 2011.	
				Régime (ss or st)					
				Données de calibration				Ringleb, J., Sallwey, J., Stefan, C., 2016. https://doi.org/10.3390/w8120579?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle	
	T03b - MT3DMS	évaluer l'impact de la qualité de l'eau, des processus géochimiques	Locale	advection	carte de concentration 2D et 3D, Beakthrough curves 	intègre qualité	Besoin données chimiques précises et plateforme ne fonctionnant que pour une seul espèce chimique	Abbo, H. et Gev, I. (2008).	INOWAS
				dispersion (longitidunale et transversale)				Bakker et al., 2016 http://dx.doi.org/10.1111/gwat.12413	
				porosité				Bedekar, V et al 2016 http://dx.doi.org/10.3133/tm6A53	
				source				Brezinski, C. ; Redivo-Zaglia, M. (1998). http://dx.doi.org/10.3133/tm6A53	
				concentration				Rahman, M. A. (2011)	
				pas de temps de transport				Ringleb, Jana et al 2016	
				Réactions et sorption				Ringleb et al., 2016	
				Diffusion Moléculaire				Zheng et Wang, 1999 https://hydro.geo.ua.edu/mt3d/mt3dmanual.pdf	
	T07 – Gestionnaire de scénario de Modèle	compare plusieurs scénarios de gestion d'aquifère à partir du modèle Numérique existant	Locale	paramètres du modèle (T03)	Comparaisoon de scénarios	visualisation diverses (en coupe transversale, vue différente, vue série chronologique)	dépend du modèle initial	Glass, J., Junghanns, R., Schlick, R., Stefan, C. (2022) http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105452	INOWAS
				Modèle calibrés					
				séries temporelles		plusieurs scérarios évaluer dans un même projet/ changement en vue		Ringleb, J., Sallwey, J., Stefan, C., 2016. https://doi.org/10.3390/w8120579	
				….					
	T03c - Ecoulement à densité variable (SEAWAT)	Evaluer l'intrusion d'eau salée dans les aquifères cotières	locale	Paramètres de transport de soluté	interface eau douce /salée	prend en compte la densité	temps de calcul élevé	Bakker et al., 2016	INOWAS
				Densité -concentration				Pauw et al., 2015	
				Viscosité	mécanismes convection-dispersion couplés			Russo et al., 2015	
				température				Vandenbohede et Van Houtte, 2012	
	T20 - Modélisation en temps réel	mise à jour automatique du modèle (étendre le modèle avec de	Locale/Régional	Nouvelles données		gestion adaptative			INOWAS
	T10-surveillance en temps réel	intégrer les données de séries temporelles dans la plateforme INOWAS pour un surveillance WEB des capteurs. visualisées, traitées, téléchargées et préparées les	Locale/Régionale	conductivité électrique, niveau d'eau, charge hydraulique, oxygène dissous		lacune de données - interpoler			INOWAS
				Température,Ph, teneur en eau, potentiel redox,					
				…					

SIG	T04 - Base de données pour la cartographie de l'aptitude des sites basée sur le SIG	explorer comment les études scientifiques qui ont séléctionné des sites MAR (66 documents scientifiques, de plus de 18 pays)	Bassin/Régional	Données internes issues des 66 publications	Tableau critères les plus utilisés pour la sélection des sites GIS-MCDA MAR 	évite le choix arbitraire de critères	Ne traite pas de données spatiales	Agarwal, R., Garg, P.K., Garg, R.D., 2013. https://doi.org/10.1007/s11269-013-0310-7	INOWAS
				critères utilisés (k, pente, usages sol, profondeur nappe,)				Ahmadi, M.M., Mahdavirad, H., Bakhtiari, B., 2017.https://doi.org/10.2166/wst.2017.273	
				paramètres des contraintes (pente, systèmes agricoles, géologie, plan d'eau, types de MAR, zone REG, limite BV…)		visualisation optimale (table /statistiques/catégories)		Fernández Escalante et al 2014,https://www.mdpi.com/2073-4441/6/7/2021	
				analyse sensibilité				Zaidi, F.K.et al 2015 https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.07.008	
				classement d'importance des critères				…	
	T05 -Analyse décisionnelle multicritère SIG	Produire une carte appropriée pour identifier les zones favorables pour MAR à partir de données géographiques, une pondératon multicritère	locale/Régional	Données géographiques, physiques, géologie,hydrogéologie, pente, usages…		Produit une carte à partir des données	pas de pris en compte de de l'évolution temporel des paramètres	Bonilla, J.et al 2016	INOWAS
						intèdre les contraintes socio-éco	Méthodes très compléxe avec beaucoup de paramètres et données	Magesh, N.S.et al 2012 https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.10.007	
				containtes réglementaires (zones protégées)		prend des données géospatiales	résultats dépend fortement des poids attribuer	Malczewski, J., Rinner, C., 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74757-4	
						le poids et critères sont explicites		Équipe de développement QGIS, 2016.	
				attribue un poids : classement/multifacteur/ comparaison		accès à des études antérieurs pour guide de choix		Shaban, A.et al 2005 https://doi.org/10.1007/s10040-005-0437-6	
						plusieurs méthodes disponible pour la pondération		…	

	T06 – MAR Method Selection	aide au choix du dispositif MAR le plus adapté	locale (site)	source d'eau		basé sur règles issus de retour d'expérience	ne génère que des informations sur les techniques réalisables	Bouwer, H. (1987). http://www.wrri.nmsu.edu/publish/watcon/proc32/Bouwer.pdf.	INOWAS
				types de sols				Büttner et al. 2004	
				usages des terres		très efficace, simple à utiliser	ne classe pas celle qui sont les plus réalisables	CGWB (2007) Manual on Artificial Recharge of Ground Water.	
				objectif de MAR (AEP, Irrigation…)		orientation vers des méthodes pertinentes		IGRAC, 2015, https://ggis.un-igrac.org/ggis-viewer/viewer/globalmar/public/default.%20PUBLI%C3%89%20DANS%20EMPIRICAL,%20OUTILS	
				Echelle (bénéficiaire : ménage, ville village)					

SAT	T01 - SAT base de donnés de réduction de la capacité d'infiltration	aider à comparer des sites et à comprendre comment et à quelle vitesse la capacité d'infiltration peut diminuer en pratique à cause de phénomènes comme le colmatage et les effets climatiques.	Bassin d'infiltration	HLR : taux de recharge hydraulique (m^3/m^2) HLC : cycle de recharge hydraulique temps d'infiltration (h) Condition climatique (froids, doux, chaux) conductivité hydraulique (m/s) echelle expérimentale	  	Basé sur données expérimentales réelles ; multi-échelles	Non prédictif ; dépend des scénarios existants	Dillon, P. (2005) https://link.springer.com/article/10.1007/s10040-004-0413-6 Laws, B. V. et al (2011) https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969710012520?via%3Dihub	INOWAS
	T18 - Conception de bassin SAT	Estimer les dimensions du bassins (surface) et le taux d'infiltration admissibles	Bassin/locale	HLR: taux de recharge hydraulique (m^3/m^2) Taux de charge en azote, NLR (kg/ha/j) Taux de chargement organique, OLR(kg/ha/j) Zone de terrain, surface (m^2) Durée d'exploitaion annuelle (jours) débit annuel vers le bassin (Q) concentration en azote et en organique		permet un dimensionnement empirique SAT		Crites, R.W., Middlebrooks, E.J., Bastian, R.K., 2014.	IOWAS

solution analytique	T02 - Calculateur de monté de nappe	Calcul de l'élevation du niveau piézométrique	Bassin d'infiltration	conductivité hydraulique (m/j) hi :niveau initial d'eau (m) Sy : coeficient d'emmagasinement L/2 démi longueur du bassin (m) l/2 démi largeur du bassin (m) durée d'infiltration (j) w : taux de percolation (m/j)			Hypothèses simplificatrices; homogénéité supposée	Hantush, M.S. (1967). http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/WR003i001p00227/abstract Carleton, M.D., 2010. http://pubs.usgs.gov/sir/2010/5102/	INOWAS
	T08 – équation de transport 1D	déterminer la concentration d'un contaminant en aval à partir d'une source constante, à une distance donnée x et temps t	locale	concentration de soluté (M/L^3) vitesse d'advection (M/L) porosité effective coef de dispersion longitidunal facteur retard densité coef de partition kd Coefficient de partage du carbone organique entre le sol et l'eau		variabilité spatiale et temporelle, prend en compte la sorption, le facteur retard, réactions organiques. Prend aussi en compte les deux types d'injection	dispersion transversale négligée	Alvarez, P.J., Illman, W.A., 2005. Bear, J., 1972. Gillham, R.W., Cherry, J.A., Barker, J.F., 1984. Hölting, B., Coldewey, W.G., 2013. Karickhoff, S.W., Brown, D.S., Scott, T.A., 1979 Ogata, A., Banks, R.B., 1961. Olshausen, H.-G., 2013. Runkel, R.L., 1996.	INOWAS
	T09 - équation simple d'intrusion salée	analyser et prédire l'emplacement de l'interface eau douce /eau salée, application en littorale	locale /Régionale	densité en eau douce et salée [M/L^3] niveau piézométrique, épaisseur de l'eau douce (au dessus) [L] débit d'eau douce, conductivité hydraulique, distances taux de recharge, gradient hydraulique, niveau de la mer,limite charge hydraulique épaisseur aquifère, débit de pompage, porosité	position approximative de l'interface saline (dimension, hauteur, surconing calculé par crainte de d'intrusion saline) 	utilise plusieurs solution analytique simple	parfois résultats non dérivé des formules pas de dynamique temporelle	Bear, J. (Éd.), 1999. Dagan, G., Bear, J., 1968. https://dx.doi.org/10.1080/00221686809500218 Schmork, S., Mercado, A., 1969. https://dx.doi.org/10.1029/WR005i006p01290 Strack, O.D.L., 1976. https://dx.doi.org/10.1029/WR012i006p01165	INOWAS

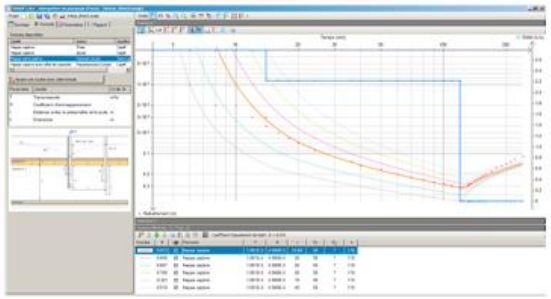
	T13 - temps de déplacement à travers un aquifère non confiné	calculer le temps de parcours de l'eau dans un aquifère libre (avec quatre types de condions aux limites)	locale/Régionale	conductivité hydraulique, taux d'infiltration moyen, porosité effective, longueur de l'aquifère, position initiale, position finale	temps de transit estimé entre un point de recharge et un point de captage 	hypothèses simplifié : régime permanent, écoulement horizontal en 1D		Chapuis, R.P., Chesnaux, R., 2006.http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2006.00141.x	INOWAS
				charge hydraulique amont et aval gradient hydraulique				Chesnaux et al., 2005),http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.0056.x	
				débit de pompage , emplacement du puit				Haitjema, Sa Majesté, 1995.	
				distance de transport				Kirkham, D., 1967. http://dx.doi.org/10.1029/WR003i002p00609	
	T14 - descente fluviale induite par le pompage	évaluation de l'impact d'un pompage sur un cours d"eau (différentes configuration du cours d'eau)	Local	débit de pompage, Transmissivité, coefficient d'emmagasinnement	Evolution temporelle du rabatement, impact du pompage au débit de la rivière	intègre interaction nappe-rivière		Hantush, M.S., 1965. http://dx.doi.org/10.1029/JZ070i012p02829	INOWAS
				temps, distance la plus courte entre le puit et le bord du cours d'eau				Hunt, B., 1999. http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.1999.tb00962.x	
				caractéristique le couche semi perméable (K,b)			pas d'hétérogénéité (k , e, Q…)	Hunt, B., 2003. http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2003)8:1(12)	
				largeur du flux				Hunt, B., 2014. http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000768	
				conductance du lit de cours d'eau				Jenkins, C.T., 1968,	
				distance entre le fond du cours d'eau et le sommet de l'aquifère			géométrie idéale (CE droit, d'une longueur infini)	Reeves, H.W., 2008.	
				….				STRMDEPL08 (indépendant) http://mi.water.usgs.gov/software/groundwater/strmdepl08/	
								STRMDEPL08 (web) http://mi.water.usgs.gov/software/groundwater/CalculateWell/index.html	

	T15 - Evaluation quantitative des risques microbiennes associé à une installation MAR.	définit la concentration de pathogènes dans l'eau , de spécifier une chaîne de traitement , de définir des scénarios d'exposition humaine, et applique des modèles dose-réponse pour calculer la probabilité d'infection ou de maladie, souvent en termes de DALYs	Bassin	épaisseur de l'aquifère étapes de traitement (coagulation, filtration, désinfection,,,) scénarios d'expositions (Qui est exposer ? et combien de fois?)					INOWAS (via Smart control)
	T17 - portail MAR mondiale	fournir un inventaire structuré des projets MAR existants dans le monde pour comparer les cas réels, analyser les volumes rechargés, identifier les méthodes et appuyer les justifications techniques	Globale, Régionale, locale	base de données : localisation et année source d'eau, type de MAR utilisation du volume prélevé références …	carte interactive mondiale, fiches détaillées des projets, filtrer par méthode	justification stratégique		Stefan, C. et Ansems, N. (2017) https://rdcu.be/LgU1	INOWAS (via IGRAC MAR-Portal)

K	Conductivité hydraulique
T	Transmissivité
S	coefficient d'emmagasinnement
n	porosité
ss	régime permanent
st	régime transitoire
b	épaisseur

OUAIP : Outil d'Aide à l'Interprétation des Pompages d'essais

La quantification des paramètres hydrodynamiques caractéristiques des aquifères est depuis la fin du XIX[ème] siècle une préoccupation majeure dans le domaine de l'hydrogéologie. Rapidement les pompages d'essais sont apparus comme la méthode la plus fiable pour la détermination de ces paramètres. L'objectif de OUAIP est de mettre à disposition de la communauté des hydrogéologues un outil d'aide l'interprétation et à la simulation des tests hydrauliques en hydrogéologie.



- ✓ OUAIP, logiciel en **cours de développement**, intègre actuellement 3 solutions analytiques (Theis 1935, Hantush-Jacob 1955 et Papadopulos-Cooper 1967) pour l'interprétation des pompages d'essais ;
- ✓ Il permet de **sélectionner et de comparer en parallèle** plusieurs solutions analytiques sur un même graphique ;
- ✓ Il propose une **procédure d'ajustement** des paramètres (bornes définies par l'utilisateur) par optimisation ;
- ✓ L'interprétation se fait sur des mesures de niveaux au puits ou au piézomètre même si le **débit est variable**.

- ✓ Deux modes de fonctionnement :
  - Le mode **simulation** consiste à calculer par anticipation les évolutions de charge hydraulique induites dans un ouvrage par une chronique de pompage déterminée, plus ou moins complexe.
  - Le mode **interprétation** permet de déterminer la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement du milieu souterrain à partir de mesures de niveau/débit réalisées pendant un pompage et la remontée du niveau.



Invite de OUAIP

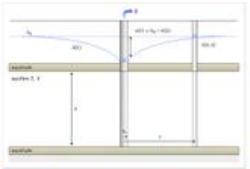
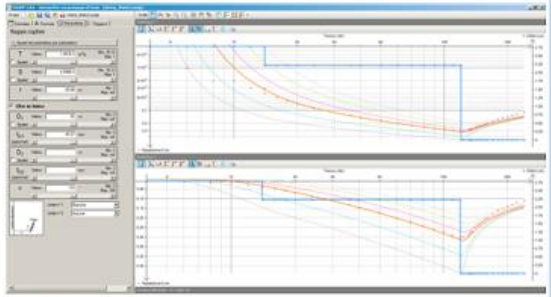


Schéma d'aide en ligne

- ✓ OUAIP permet d'associer deux fenêtres de **visualisation des données** afin de faciliter le calage (graphique arithmétique et semi-logarithmique ci-contre)
- ✓ **L'import et l'export des données** peut-être simplement réalisé « à la volée » par simple copier-coller depuis un tableur (Excel, OpenOffice)
- ✓ Dans sa version actuelle, OUAIP permet d'associer à l'interprétation des **effets perturbateurs** tels que :
  - Effet de capacité
  - Effet de vidange
  - Effet de skin (effet pariétal)
  - Pertes de charges quadratiques
  - Effets de limites (alimentée, étanche)



Téléchargez gratuitement la version bêta de OUAIP : http://ouaip.brgm.fr



Auteurs

Gutierrez A.[1], Dewandel B.[1], Croiset N.[1], Klinka T.[1], Ehsass J.[2]

(1) BRGM - Service D3E, 3 avenue C. Guillemin, 45060 Orléans Cedex a.gutierrez@brgm.fr, b.dewandel@brgm.fr, n.croiset@brgm.fr, t.klinka@brgm.fr
(2) Développement informatique, circular@operamail.com / http://webinaxscript.fr

www.brgm.fr

TRAC : un outil d'aide à l'interprétation des traçages en milieu poreux

Les traçages en hydrogéologie sont des expérimentations *in situ* qui consistent à injecter un traceur conservatif (qui ne réagit pas ou peu avec le milieu) dans le sous-sol afin d'en observer la restitution après son transport par les eaux souterraines. Ces traçages sont parfois exploités uniquement de manière qualitative. L'objectif de TRAC est de mettre à disposition de la communauté des hydrogéologues un outil d'aide à la préparation et à l'interprétation des traçages artificiels. Ces méthodes sont en effet des outils indispensables pour la protection et la gestion de la ressource en eau.

1. Contexte

Le suivi de l'injection et de la restitution de traceurs est souvent interprété de manière binaire. En réalité, la courbe des concentrations obtenues aux sites de restitution dépend du signal d'émission (l'injection du produit dans la nappe) et des modalités d'écoulement dans l'aquifère.

L'interprétation de cette courbe de restitution est riche d'enseignement sur le transfert potentiel de contaminants et sur la description des paramètres hydrodispersifs.

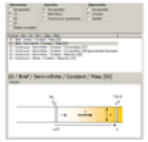


Essai de traçage : injection, restitution et interprétation

2. Solutions analytiques

TRAC repose sur l'utilisation de solutions analytiques validées (comparaison avec des modèles numériques) à sélectionner selon la configuration du traçage. Il permet de sélectionner une méthode d'interprétation correspondant aux contextes suivants :

- ✓ 1D, 2D, écoulement radial convergent/divergent ;
- ✓ Injection instantanée (Dirac), continue ou par palier ;
- ✓ Prise en compte du facteur de retard, d'une constante de dégradation (de forme exponentielle) ;
- ✓ Prise en compte d'une dispersivité variable (effet d'échelle) dans l'espace (temps) ;
- ✓ Prise en compte de l'incertitude sur la direction de l'écoulement

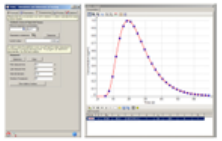


Un jeu de 12 solutions analytiques

3. Dimensionnement et interprétation d'un essai

TRAC offre deux modes d'utilisation :

- ✓ Le mode « simulation » permet d'estimer la masse optimale de traceur ou la concentration à injecter ainsi que la fréquence d'échantillonnage;
- ✓ Le mode « interprétation » consiste à déterminer par calage les paramètres hydrodispersifs du milieu.

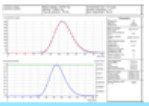


Dimensionnement d'un essai

Invite de TRAC



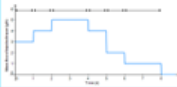
Les options d'impression permettent une représentation synthétique de l'essai et de son interprétation avec notamment le récapitulatif des paramètres retenus, le tracé de la DTS et courbe de restitution cumulée.



Rapport de synthèse

4. Fonctionnalités

- ✓ **Ecoulement radial convergent** (injection instantanée, continue, par paliers) : une nouvelle solution approchée a été développée spécifiquement pour cette configuration fréquente de traçage (en cours de publication, D. Thiéry) ;
- ✓ **Injection par paliers** : l'intégration du principe de superposition dans TRAC permet aux utilisateurs d'interpréter des essais de traçage à l'aide d'un assistant ;
- ✓ **Calage par optimisation** : outre la possibilité de réaliser un ajustement manuel des paramètres (vitesse réelle, porosité efficace, dispersivité) par essai/erreur, TRAC intègre un calage semi-automatique par optimisation des paramètres (algorithme de Rosenbrock modifié, 1960) ;
- ✓ **Ajoutez vos propres solutions analytiques** : TRAC permet à l'utilisateur d'ajouter directement de nouvelles solutions analytiques au logiciel.



Injection par paliers



Ecoulement radial convergent

Téléchargez TRAC gratuitement sur : http://trac.brgm.fr Traduit en :

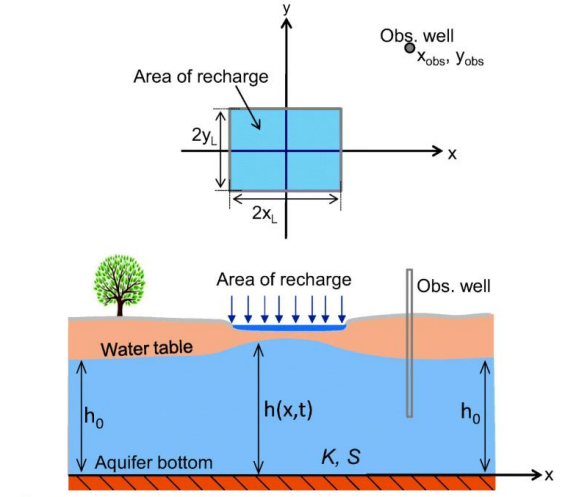
Auteurs

Gutierrez A.[1], Klinka T.[1], Thiéry D.[1], Ehsass J.[1]
Avec la collaboration de Ahumada Y.[2], Binet S.[3], Joqja N.[4], Leclerc B.[5], Défarge C.[2, 4], Soubourou C.[6], Dufour A.[6]
(1) BRGM - Service EAU, 3 avenue C. Guillemin, 45060 Orléans Cedex a.gutierrez@brgm.fr, t.klinka@brgm.fr, d.thiery@brgm.fr
(2) EGID, Université de Bordeaux 3
(3) ISTO, Université d'Orléans/CNRS-INSU
(4) CETRAHE, Université d'Orléans
(5) EDREE, 45160 Olivet
(6) UNICEM Centre, 45404 Fleury-les-Aubrais cedex
(7) Développement informatique, circular@operamail.com / http://webinaxscript.fr

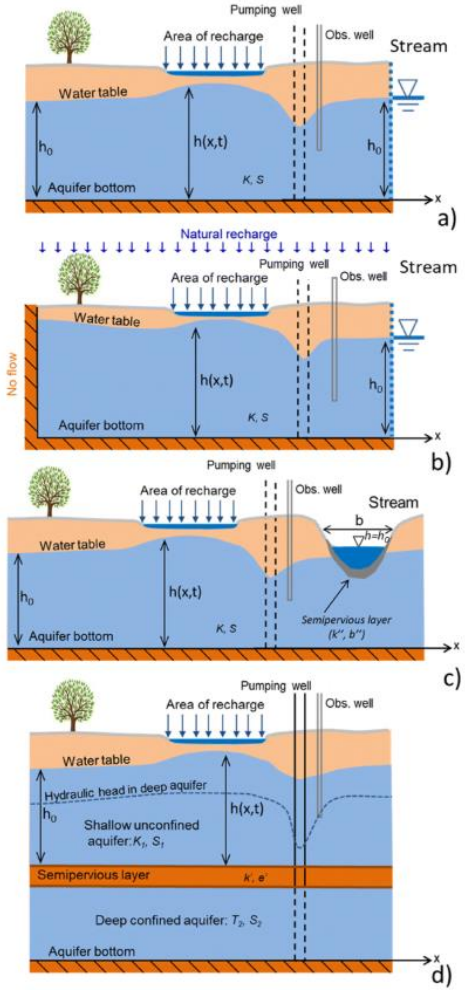
www.brgm.fr

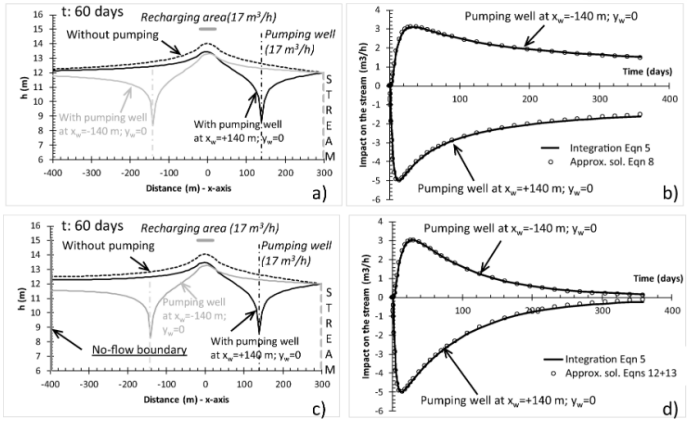
Solutions analytiques de la piézométrie et de l'impact sur un cours d'eau basée sur une méthode de superposition spatiale

Modèles conceptuels des exemples théoriques. a) Recharge et pompage d'un aquifère isotrope situé à proximité d'un cours d'eau (condition de Dirichlet). b) Recharge et pompage d'un aquifère isotrope délimité dans l'espace par un cours d'eau (condition de Dirichlet) et une frontière sans écoulement (aquifère en bande), avec et sans l'influence d'une recharge naturelle. c) Recharge et pompage d'un aquifère à proximité d'un cours d'eau dont le lit est obstrué et qui pénètre partiellement dans l'aquifère. d) Recharge d'un aquifère de surface non confiné et isotrope et pompage d'un aquifère de fond semi-confiné. Dewandel, B., Lanini, S., Hakoun, V. *et al.* Artificial aquifer recharge and pumping: transient analytical solutions for hydraulic head and impact on streamflow rate based on the spatial superposition method. *Hydrogeol J* **29**, 1009–1026 (2021). https://doi.org/10.1007/s10040-020-02294-9

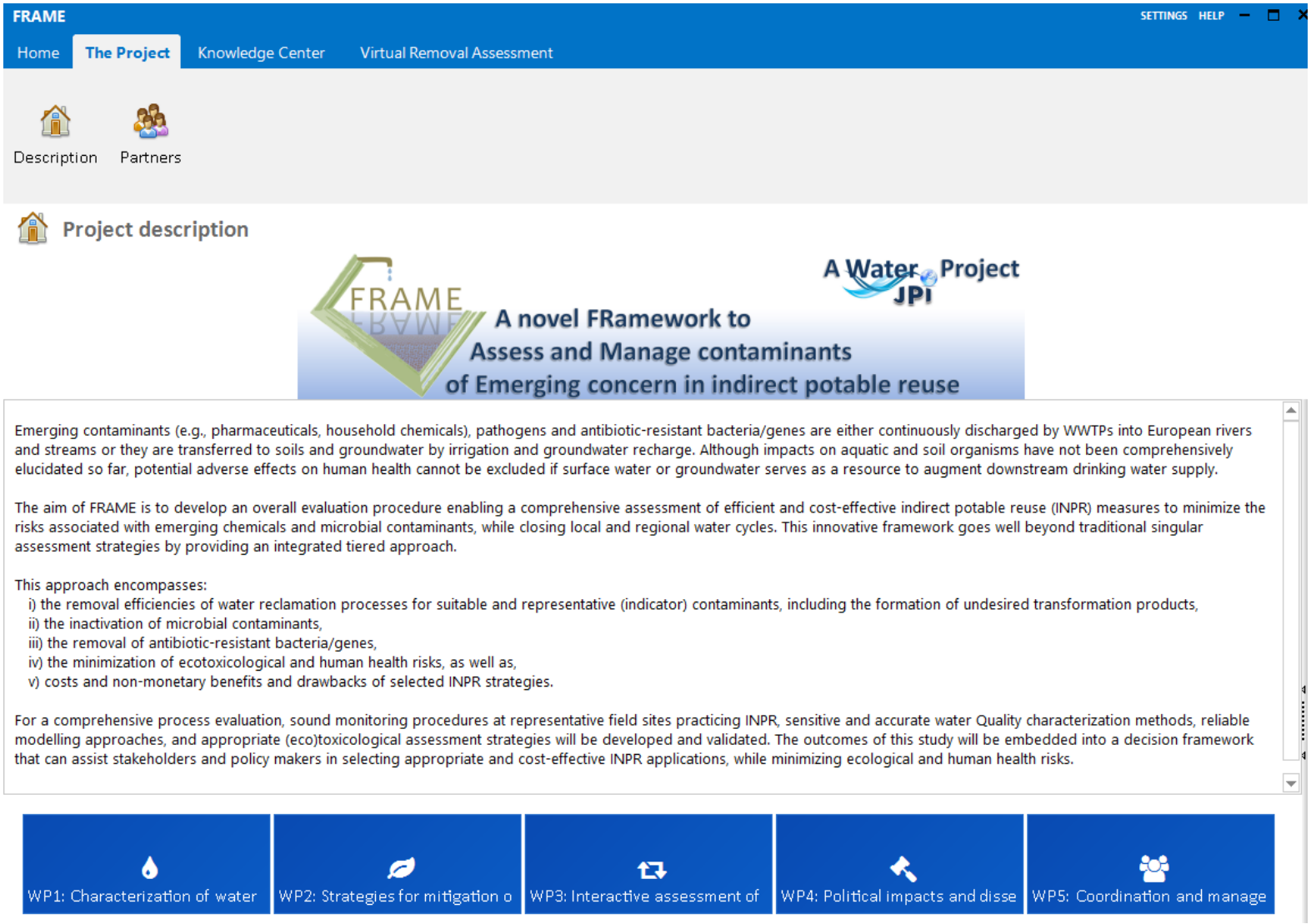


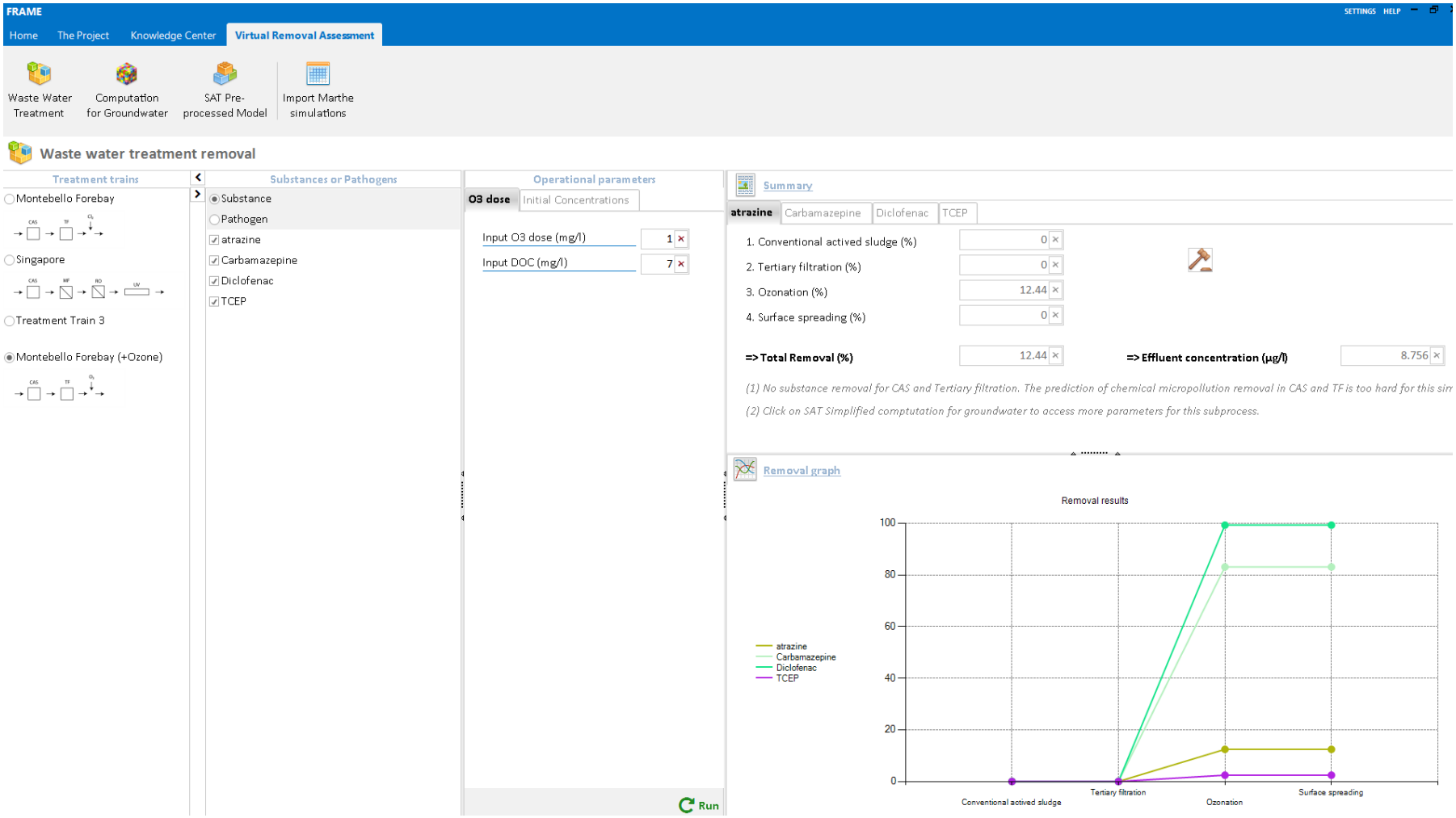
Sketch (plan and section views) of Hantush's (1967) conceptual model of groundwater mounding from a rectangular recharging area

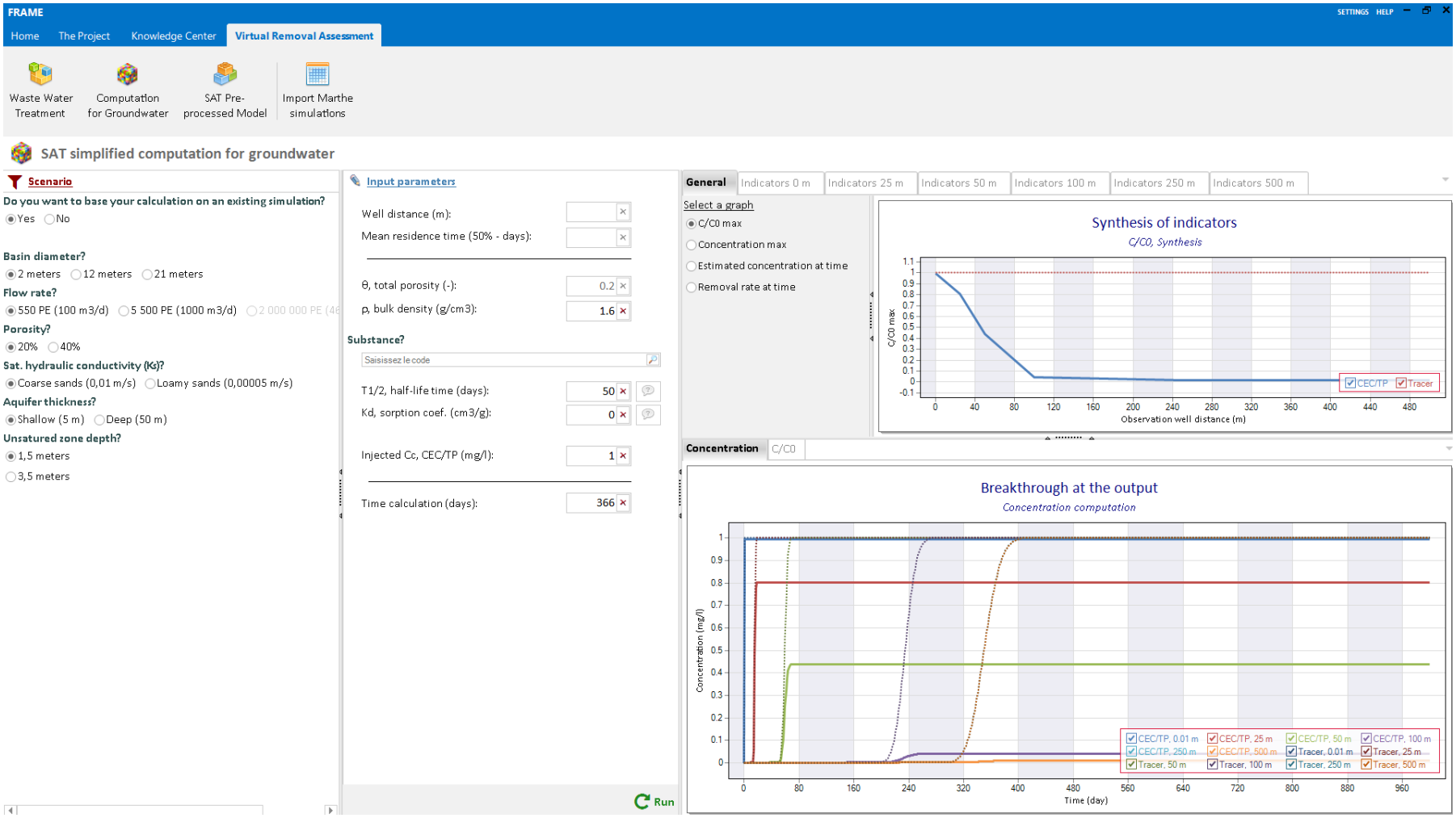




Hydraulic-head profiles after 60 days (**a** and **c**), and impacts on streamflow rate (**b** and **d**). Impact <0 indicates a decrease of streamflow rate and impact >0 indicates an increase. **a**–**b** Recharging and pumping an isotropic aquifer near a stream (refer to Figs. 1a and 3a). **c**–**d** Recharging and pumping an isotropic aquifer limited in space by a river and a no-flow boundary (strip aquifer, refer to Figs. 1b and 3b). $K = 10^{-4}$ m/s, $S = 0.05$, $h_0 = 12$ m, $x_L = y_L = 40$ m, $R = 2.96 \times 10^{-6}$ m/s and $Q_{Pump} = 17$ m³/h


FRAME
SETTINGS HELP
Home
The Project
Knowledge Center
Virtual Removal Assessment
Description
Partners
Project description
FRAME
A Water JPI Project
A novel FRamework to
Assess and Manage contaminants
of Emerging concern in indirect potable reuse
Emerging contaminants (e.g., pharmaceuticals, household chemicals), pathogens and antibiotic-resistant bacteria/genes are either continuously discharged by WWTPs into European rivers and streams or they are transferred to soils and groundwater by irrigation and groundwater recharge. Although impacts on aquatic and soil organisms have not been comprehensively elucidated so far, potential adverse effects on human health cannot be excluded if surface water or groundwater serves as a resource to augment downstream drinking water supply.
The aim of FRAME is to develop an overall evaluation procedure enabling a comprehensive assessment of efficient and cost-effective indirect potable reuse (INPR) measures to minimize the risks associated with emerging chemicals and microbial contaminants, while closing local and regional water cycles. This innovative framework goes well beyond traditional singular assessment strategies by providing an integrated tiered approach.
This approach encompasses:
i) the removal efficiencies of water reclamation processes for suitable and representative (indicator) contaminants, including the formation of undesired transformation products,
ii) the inactivation of microbial contaminants,
iii) the removal of antibiotic-resistant bacteria/genes,
iv) the minimization of ecotoxicological and human health risks, as well as,
v) costs and non-monetary benefits and drawbacks of selected INPR strategies.
For a comprehensive process evaluation, sound monitoring procedures at representative field sites practicing INPR, sensitive and accurate water Quality characterization methods, reliable modelling approaches, and appropriate (eco)toxicological assessment strategies will be developed and validated. The outcomes of this study will be embedded into a decision framework that can assist stakeholders and policy makers in selecting appropriate and cost-effective INPR applications, while minimizing ecological and human health risks.
WP1: Characterization of water
WP2: Strategies for mitigation o
WP3: Interactive assessment of
WP4: Political impacts and disse
WP5: Coordination and manage


FRAME
SETTINGS HELP
Home
The Project
Knowledge Center
Virtual Removal Assessment
Waste Water Treatment
Computation for Groundwater
SAT Pre-processed Model
Import Marthe simulations
Waste water treatment removal
Treatment trains
Montebello Forebay
Singapore
Treatment Train 3
Montebello Forebay (+Ozone)
Substances or Pathogens
Substance
Pathogen
atrazine
Carbamazepine
Diclofenac
TCEP
Operational parameters
O3 dose
Initial Concentrations
Input O3 dose (mg/l)
Input DOC (mg/l)
Run
Summary
atrazine
Carbamazepine
Diclofenac
TCEP
1. Conventional actived sludge (%)
2. Tertiary filtration (%)
3. Ozonation (%)
4. Surface spreading (%)
=> Total Removal (%)
=> Effluent concentration (µg/l)
8.756
(1) No substance removal for CAS and Tertiary filtration. The prediction of chemical micropollution removal in CAS and TF is too hard for this sim
(2) Click on SAT Simplified comptutation for groundwater to access more parameters for this subprocess.
Removal graph
Removal results
100
80
60
40
20
0
atrazine
Carbamazepine
Diclofenac
TCEP
Conventional actived sludge
Tertiary filtration
Ozonation
Surface spreading


FRAME
SETTINGS HELP
Home
The Project
Knowledge Center
Virtual Removal Assessment
Waste Water Treatment
Computation for Groundwater
SAT Pre-processed Model
Import Marthe simulations
SAT simplified computation for groundwater
Scenario
Do you want to base your calculation on an existing simulation?
Yes No
Basin diameter?
2 meters 12 meters 21 meters
Flow rate?
550 PE (100 m3/d) 5 500 PE (1000 m3/d)
Porosity?
20% 40%
Sat. hydraulic conductivity (Ks)?
Coarse sands (0,01 m/s) Loamy sands (0,00005 m/s)
Aquifer thickness?
Shallow (5 m) Deep (50 m)
Unsatured zone depth?
1,5 meters
3,5 meters
Input parameters
Well distance (m):
Mean residence time (50% - days):
θ, total porosity (-): 0.2
ρ, bulk density (g/cm3): 1.6
Substance?
Saisissez le code
T1/2, half-life time (days): 50
Kd, sorption coef. (cm3/g): 0
Injected Cc, CEC/TP (mg/l): 1
Time calculation (days): 366
Run
General
Indicators 0 m
Indicators 25 m
Indicators 50 m
Indicators 100 m
Indicators 250 m
Indicators 500 m
Select a graph
C/C0 max
Concentration max
Estimated concentration at time
Removal rate at time
Synthesis of indicators
C/C0, Synthesis
C/C0 max
Observation well distance (m)
CEC/TP
Tracer
Concentration
C/C0
Breakthrough at the output
Concentration computation
Concentration (mg/l)
Time (day)
CEC/TP, 0.01 m
CEC/TP, 25 m
CEC/TP, 50 m
CEC/TP, 100 m
CEC/TP, 250 m
CEC/TP, 500 m
Tracer, 0.01 m
Tracer, 25 m
Tracer, 50 m
Tracer, 100 m
Tracer, 250 m
Tracer, 500 m

Annexe 5 Focus sur certains leviers, contraintes et perspectives de la recharge maîtrisée des aquifères en France

Absence de définition opérationnelle de la recharge maitrisée des aquifères

La recharge maitrisée des aquifère ne bénéficie pas d'un statut clairement identifié dans le cadre de la gestion quantitative de l'eau. Cette absence de définition explicite peut entrainer des interprétations variables selon les services instructeurs, générer des incertitudes pour les porteurs de projet et complique l'intégration de ces opérations dans les documents de planification. **Une clarification des notions et du périmètre des opérations concernées apparait donc nécessaire.**

Comme indiqué précédemment, les textes nationaux et les textes européens utilisent le terme « recharge artificielle des eaux souterraines » mais ne proposent pas de définition précise de cette notion. Cependant, un arrêt de la Cour de justice des Communautés européennes (CJCE, 2009-10-15, n° C-263/08) de 2009, précise que la notion n'est pas restreinte aux projets qui implique l'utilisation ultérieure des eaux. En l'espèce, « un projet […] portant sur l'évacuation des eaux d'infiltration dans un tunnel qui abrite des lignes électriques et l'injection d'eau dans le sol ou la roche afin de compenser une baisse éventuelle du niveau des eaux souterraines ainsi que sur la réalisation et le maintien d'installations d'évacuation et d'apport d'eau » doit être considéré comme dispositif de recharge artificielle des eaux souterraines.

La notion de recharge artificielle implique que seuls les projets conduisant à la mise en place d'un « dispositif » de recharge sont concernés (par exemple, l'aménagement d'installations spécifiques qui n'existent pas naturellement, comme l'aménagement d'un bassin d'infiltration). Ainsi, sont visées les opérations d'alimentation significative et non naturelle d'un aquifère par accélération ou augmentation des transferts des eaux.

Au-delà de cette difficulté de définition, le cadre règlementaire français présente encore des zones d'incertitude. Les catégories juridiques existantes ne permettent pas toujours de rendre compte de la diversité des techniques de recharge maîtrisée des aquifères. Certaines pratiques pourraient ainsi se situer à la frontière de plusieurs régimes règlementaires, ce qui renforce le besoin de clarification du droit applicable.

Mise en cohérence du cadre réglementaire fragmenté : enseignements tirés des forages d'eau

L'absence de cadre règlementaire spécifique à la recharge maîtrisée des aquifères en France conduit à un encadrement éclaté, dépendant à la fois du type d'eau utilisées, de la typologie du dispositif de recharge et des usages associés au projet. Cette fragmentation peut nuire à la lisibilité et à la cohérence de l'action publique, et constitue un frein potentiel au déploiement de ces opérations.

Un travail approfondi pourrait être mené avec les différents acteurs participants aux étapes de réalisation de projet de recharge maîtrisée des aquifères (ingénieur, chercheur, opérateur, porteur, financeur, législateur, décideur) afin d'identifier plus en détails les éventuels points réglementaires facilitant, bloquant voir manquant et proposer une mise en cohérence du cadre réglementaire.

Dans ce contexte, l'expérience récente de mise en cohérence du cadre règlementaire applicable aux forages d'eau constitue un retour d'expérience particulièrement pertinent pour nourrir la réflexion.

Le constat initial était que les forages d'eau (au sens large de « tout forage réalisé dans le but d'atteindre une nappe d'eau souterraine » : forage d'exploitation, piézomètre, sondage, forage de réinjection, forage de reconnaissance…) sont soumis à des réglementations différentes selon leurs fonctions et usages : Code de l'Environnement (plusieurs rubriques et articles), Code des Collectivités Territoriales, Code minier. De ce fait, deux forages identiques, à profondeurs équivalentes, peuvent être soumis à des prescriptions réglementaires divergentes pour leur réalisation dès lors que leurs usages sont différents, alors même qu'ils constituent un danger similaire pour la ressource. Dans de nombreux cas, les interprétations de la réglementation diffèrent selon les branches professionnelles, et les modalités d'application sont distinctes d'un territoire à un autre.

Partant de ce constat, la Direction de l'Eau et de la Biodiversité a engagé un processus visant à simplifier les modalités de déclaration des forages d'eau sous une réglementation unifiée (Code minier), tout en renforçant les sanctions en cas de non-déclaration. Afin de garantir le principe de non-régression en matière environnementale, la contrepartie de cette simplification est d'une part la montée en compétence et le contrôle des acteurs de la filière par la mise en place d'une certification obligatoire des foreurs, et d'autre part l'amélioration des pratiques par la mise en cohérence des prescriptions réglementaires.

Un groupe de travail (GT) a été mis en place en 2024 par la Direction de l'Eau et de la Biodiversité, avec l'appui du BRGM ; il regroupe des représentants des filières professionnelles réalisant des forages, des services déconcentrés de l'Etat, des collectivités territoriales et des organisations professionnelles des hydrogéologues. Le GT a été le lieu d'échanges sur l'élaboration des textes de référence concernant l'ensemble des forages :

- Un arrêté définissant les règles générales relatives à la réalisation, au suivi et au comblement des forages d'eau.
- Un arrêté fixant les modalités de certification des entreprises de forage, y compris un référentiel de certification.

Ces textes sont en cours de finalisation, et l'entrée en vigueur de la certification pour les forages non domestiques est prévue pour le 31 décembre 2027 au plus tard.

Afin de préparer l'entrée en vigueur des textes, et en réponse aux demandes fortes exprimées en groupe de travail par les acteurs, le GT sera maintenu sur 2026-2027 dans le cadre de l'élaboration des éléments d'accompagnement opérationnel que constituent les guides d'application de ces arrêtés. A mi-chemin de ce processus, le premier retour d'expérience est que la mise en cohérence de la réglementation portant sur une installation susceptible d'impacter significativement les eaux souterraines, dès lors que cette réglementation est disparate et soumise à des divergences fortes d'interprétation, nécessite une démarche longue et un portage fort, car elle implique de mobiliser des acteurs multiples et d'intérêts divergents.

Ce retour d'expérience présente des enseignements directement transposables au cas de la recharge maîtrisée des aquifères. L'exemple des forages d'eau montre l'intérêt d'engager une démarche similaire de cohérence, reposant sur une clarification du cadre juridique applicable, une harmonisation des prescriptions techniques et un travail collectif associant l'ensemble des parties prenantes.

Questionnement sur les eaux usées traitées « réutilisées » et économie circulaire

La question de l'usage des eaux usées traitées (EUT) dans les systèmes de recharge maîtrisée des aquifères voire de la réutilisation (dite indirecte lorsqu'il y a un écoulement par le sol et l'aquifère) des eaux usées traitées lorsqu'un prélèvement d'eau souterraine y est associé, est abordée sur la base de deux documents (Joint Research Centre – JRC - (Alcalde-Sanz *et al.*, 2017) de la Commission européenne et institut national de l'économie circulaire (Maurer, 2018). Les principaux éléments de ces documents sont repris et cités ci-après en se focalisant sur la recharge maîtrisée des aquifères.

Depuis en France, un panorama de la réutilisation des eaux usées traitées (REUT) a été réalisé en 2022 en s'appuyant sur des enquêtes auprès des services de l'état et des maîtres d'ouvrages (Lombard-Latune *et al.*, 2023) .Via le Plan Eau, le gouvernement accélère la mise en œuvre de la REUT avec pour objectif de développer 1 000 projets de réutilisation sur l'ensemble du territoire d'ici 2027 et de multiplier par dix le volume d'eaux usées traitées réutilisées pour d'autres usages d'ici 2030. Ce développement se base sur une adaptation de la réglementation, de la durée d'expérimentation, de la simplification de l'instruction des dossiers, des moyens de financements des Agences de l'eau pour accompagner les municipalités dans leur projet ainsi que de la mise en place de partenariats et réseaux entre acteurs. Un programme national d'accélération de la REUT sur les territoires littoraux a été également lancé en 2023 dans le cadre du Plan Eau national piloté par le Ministère de la transition écologique, le Cerema et l'ANEL. Dans ce cadre national, la REUT est défini comme la pratique qui « vise à réutiliser, après traitement approprié, les eaux usées pour certains usages anthropiques avant de les rejeter dans l'environnement, évitant par là-même de mobiliser des eaux prélevées dans le milieu pour ces besoins […] » (Aït-Mouheb *et al.*, 2022 dans Lombard-Latune et Bruyere, 2023).

Les dispositifs de recharge maîtrisée des aquifères utilisant les eaux usées traitées ne sont pas considérés dans ces initiatives nationales. Cela questionne et prête à confusion d'autant plus que des retours d'expérience pérenne de système de recharge maîtrisée des aquifères utilisant les eaux usées traitées dans la production d'eau dédiée à l'eau potable et à l'agriculture (Van Houtte *et al.*, 2021)(site Aquaduin en Belgique (Van Houte *et al.* 2011 ; 2021) et site Shafdan en Israël (Icekson-Tal *et al.*, 2003) sont mis en avant à l'échelle européenne et internationale sous le terme « water reuse » ou « reclaimed water » via le réseau d'acteurs Water Reuse Europe[31] par exemple. Sous l'angle de l'économie circulaire, l'importance de l'allongement du cycle de vie des ressources produites minimisant l'utilisation des matières premières (énergie, produits chimiques, ressource en eau, etc.) et la production de déchets interroge particulièrement les pratiques de REUT et de recharge maîtrisée des aquifères. Les deux solutions devant être étudiées conjointement pour examiner les incidences et bénéfices sur la ressource en eau allant bien au-delà des dispositifs mis en œuvre (modifications éventuelles des pratiques et des usages, modifications éventuelles de la qualité des eaux, contrôle et surveillance de la qualité des eaux souterraines différents entre les solutions) mais aussi sur la production et la valorisation des déchets issus des traitements, le besoin en énergie, le coût humain et financier, …. En omettant le lien étroit entre REUT et recharge maîtrisée des aquifères, les synergies peuvent être limitées, les acteurs cloisonnés et les solutions retenues potentiellement moins appropriées ou moins optimisées.

Le rapport du Joint Research Centre – JRC - (Alcalde-Sanz *et al.*, 2017) de la Commission européenne met en lumière l'importance croissante de la réutilisation de l'eau comme solution durable pour répondre aux défis de la pénurie d'eau et de la gestion des ressources hydriques en Europe. Ce rapport propose des exigences minimales de qualité pour la réutilisation de l'eau

[31] https://www.water-reuse-europe.org/

dans l'irrigation agricole et la recharge des aquifères, en s'appuyant sur une approche de gestion des risques. Il a servi de base technique pour l'élaboration de la réglementation européenne sur la réutilisation de l'eau, notamment le Règlement (UE) 2020/741 transposé en droit français dans le code de l'environnement (décret n° 2023-835 du 29 août 2023 et arrêté REUT adaptant la réglementation nationale existante via arrêté du 2 août 2010 relatif à l'utilisation d'eaux issues du traitement d'épuration des eaux résiduaires urbaines pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts, modifié).

La nécessité d'agir au niveau de l'UE en vue d'accroître la réutilisation de l'eau avait déjà été identifiée dans la communication de la Commission de 2012 intitulée « Un plan d'action pour préserver les ressources en eau de l'Europe » (COM(2012)673). Cette initiative contribuerait à la réalisation de certains objectifs clés du 7e programme d'action pour l'environnement de l'UE à l'horizon 2020 (à savoir protéger, préserver et valoriser le capital naturel de l'Union et faire de celle-ci une économie efficace dans l'utilisation des ressources). À l'heure actuelle, l'adoption de solutions de réutilisation de l'eau reste limitée par rapport à leur potentiel, qui reste largement inexploité. Dans la communication de 2015 intitulée « Boucler la boucle – Un plan d'action de l'UE pour l'économie circulaire » (COM/2015/614) et dans l'évaluation d'impact préliminaire de l'initiative de l'UE en matière de réutilisation de l'eau, l'irrigation agricole et la recharge des aquifères ont été identifiées comme les principales sources potentielles de demande en eau réutilisée. En effet, ces deux applications présentent le plus grand potentiel en termes d'adoption à grande échelle, d'atténuation de la pénurie et de pertinence pour l'UE : l'irrigation agricole en tant que principal utilisateur d'eaux usées traitées et en raison de ses liens avec le marché intérieur, et la recharge des aquifères en raison de la nature transfrontalière de nombreux aquifères. L'un des principaux objectifs est donc d'encourager une utilisation efficace des ressources et de réduire les pressions sur le milieu aquatique, en particulier la pénurie d'eau, en favorisant le développement d'une réutilisation sûre des eaux usées traitées. Afin de contribuer à l'élaboration d'un instrument juridique de l'UE visant ces deux applications de réutilisation de l'eau, le rapport recommande des exigences minimales de qualité pour la réutilisation de l'eau dans l'irrigation agricole et la recharge des aquifères, fondées sur une approche de gestion des risques.

La Commission a publié en avril 2016 une analyse d'impact préliminaire sur les « Exigences minimales de qualité pour les eaux réutilisées dans l'UE (nouvelle législation de l'UE) », indiquant que l'initiative visant à adopter un règlement sur les exigences minimales de qualité pour les eaux réutilisées dans l'irrigation agricole et la recharge des aquifères encouragera une utilisation efficace des ressources et réduira les pressions sur le milieu aquatique, apportera clarté, cohérence et prévisibilité aux opérateurs du marché, et complétera la politique européenne existante en matière d'eau, notamment la directive-cadre sur l'eau et la directive relative au traitement des eaux urbaines résiduaires. L'intention d'aborder la réutilisation de l'eau au moyen d'une nouvelle proposition législative a été notée avec intérêt par le Conseil dans ses conclusions sur la gestion durable de l'eau (11902/16). Par ailleurs, le Parlement européen, dans sa résolution sur le suivi de l'initiative citoyenne européenne « Right2Water » de septembre 2015, a encouragé la Commission à élaborer un cadre législatif sur la réutilisation de l'eau, tout comme le Comité des régions, dans son avis intitulé « Un système efficace de gestion de l'eau : une approche axée sur des solutions innovantes » de décembre 2016.

L'élaboration d'exigences minimales de qualité pour la réutilisation de l'eau dans l'irrigation agricole et la recharge des aquifères s'appuie sur un cadre de gestion des risques, qui est recommandé pour faire face aux risques sanitaires et environnementaux et garantir une utilisation sûre de l'eau recyclée. Les exigences minimales définies ici garantissent une protection adéquate de la santé et de l'environnement et renforcent ainsi la confiance du public dans les pratiques de réutilisation. Le présent document contribuait à établir une approche commune en matière de réutilisation de l'eau dans l'ensemble de l'UE, en apportant clarté, cohérence et prévisibilité aux

opérateurs du marché qui souhaitent investir dans la réutilisation de l'eau au sein de l'UE dans des conditions réglementaires comparables.

L'approche au cas par cas retenue pour les exigences de qualité relatives à la recharge maîtrisée des aquifères est recommandée par les lignes directrices australiennes sur la recharge artificielle des aquifères (NRMMCEPHC–NHMRC, 2009), les lignes directrices de l'USEPA (USEPA, 2012) et la réglementation californienne (CDPH, 2014). Les lignes directrices de l'USEPA et la réglementation californienne établissent des exigences de qualité spécifiques pour la réutilisation indirecte à des fins potables par recharge maîtrisée des aquifères, similaires aux exigences de qualité de l'eau potable, car elles établissent une distinction entre les aquifères d'eaux souterraines potables et non potables. La directive « eau potable » (GWD) est la directive européenne la plus directement liée à la recharge maîtrisée des aquifères. Compte tenu des dangers potentiellement présents dans les eaux usées, qu'ils soient microbiologiques ou chimiques, une évaluation des risques doit être réalisée afin d'identifier les dangers supplémentaires non prévus par la directive sur l'eau potable (GWD) et susceptibles de représenter un risque pour la santé ou l'environnement. Cela est également conforme aux lignes directrices et réglementations qui considèrent la recharge contrôlée des aquifères à l'aide d'eaux recyclées comme un processus spécifique à chaque site en matière de gestion des risques (NRMMC-EPHC–NHMRC, 2009 ; USEPA, 2012 ; CDPH, 2014).Cette situation, caractérisée par un cadre de conditions limites hautement spécifique à chaque site à prendre en compte pour les aquifères, rend très difficile l'établissement de valeurs paramétriques à l'échelle de l'UE devant être mises en œuvre.

Le rapport de l'institut national de l'économie circulaire (Maurer, 2018) dressait un bilan de l'époque de la situation française en termes de réutilisation des eaux usées traitées. Cet exercice devait permettre d'identifier les bonnes pratiques et les efforts à fournir en priorité, d'établir des réflexions quant aux freins et leviers qui entourent cette pratique de l'économie circulaire, afin de sensibiliser plus largement les acteurs de l'eau sur la pratique de la réutilisation des eaux usées traitées. Ce travail a permis d'identifier le potentiel de méthodes diverses de valorisation des eaux usées traitées et de leurs co-produits associés. Ainsi en prenant en compte la diversité des solutions, un territoire en quête de modèles innovants dans la gestion de l'eau, pourra construire une stratégie adaptée à son propre contexte. Le rapport rappel l'un des fondements de l'économie circulaire qui est de rallonger la durée d'usage de la ressource, en s'appuyant sur l'ensemble des services que peut rendre la ressource, en recherchant une valorisation maximale de ses co-produits. L'eau en est un parfait exemple par les opportunités de multi-usages qu'offrent les eaux usées traitées. Dans ce rapport, la REUT est mentionnée comme solution pour soutenir le niveau des nappes d'eau souterraines et combattre l'intrusion saline.

Les plans de gestion de la politique de l'eau basés sur des considérations transversales et à l'échelle du bassin doivent s'appuyer sur l'ensemble des solutions possibles. Or, face aux pressions grandissantes qui existent sur les aquifères souterrains, à cause de la démographie galopante et du changement climatique, les ressources durables et disponibles tout au long de l'année doivent devenir des matrices centrales dans les planifications territoriales, comme c'est le cas des EUT. Les avantages de la recharge maîtrisée des aquifères grâce à la REUT sont nombreux : utilisation de la capacité géo-épuratoire des sols, soutien de nappes surexploitées, lutte contre l'invasion saline, stockage d'eau pour les périodes de fortes demandes. Cette pratique n'est cependant pas sans danger, et doit être réalisée de manière contrôlée et respectueuse du milieu. La règlementation doit donc pouvoir encadrer cet usage en proposant des règles claires et adaptées à la diversité des contextes. Il s'agit d'adapter et d'optimiser les procédés aux plus proches des besoins du territoire, dans la philosophie de l'économie circulaire : chaque zone doit être précisément caractérisée (géochimie des sols, imperméabilité, qualité des eaux souterraines). Cela permettra de calibrer la qualité des EUT à injecter, afin de mettre au maximum à profit les capacités géo-épuratoire du sol, sans pour autant provoquer de pollution. Un suivi en

continu doit être implémenté, afin de contrôler en temps réel la qualité des aquifères souterrains. Ce contrôle permettra si besoin de refluer les EUT ailleurs, afin d'éviter toute forme de pollution du milieu souterrain.

Bien que cette pratique ne soit pas encore très répandue en France, de plus en plus de collectivités territoriales se penchent sur les opportunités que représente la recharge maîtrisée des aquifères grâce à la REUT. On peut notamment citer la métropole de Toulon, qui a ouvert une vaste réflexion sur le sujet afin de protéger la nappe d'eau souterraine du Var, qui est soumise à des pressions particulièrement fortes en saison estivale. On imagine que le calendrier politique orienté vers le développement durable, que le déploiement de l'économie circulaire au niveau national et européen, que la transformation progressive de la vision des administrations sur le sujet, coïncident aujourd'hui pour avancer vers des projets plus ambitieux que ceux que nous connaissions jusqu'alors. Il faut donc continuer le travail de pédagogie auprès des élus locaux et des agences compétentes vis-à-vis de la politique de l'eau, afin que ces pratiques puissent être étudiées plus généralement dans les SDAGE et SAGE.

Enfin, les autorités politiques françaises doivent s'emparer du sujet de la recharge maîtrisée des aquifères afin de pouvoir proposer un avis moteur et réfléchi au niveau national et européen. En effet, comme nous avons pu le préciser plus haut, une réflexion est menée depuis le début de l'année 2017 afin de proposer des normes européennes pour cadrer la REUT pour la recharge maîtrisée des aquifères (entre autres). Cette position se base sur un travail de consultation des parties prenantes actives sur le sujet, afin de pouvoir mettre en valeur les savoir-faire français, mettant à profit les investissements réalisés par la recherche publique et privée, et attester du potentiel qu'il existe pour l'économie circulaire. De plus, une règlementation européenne ambitieuse permettrait de rassurer les porteurs de projets, qui travaillent pour le moment sur des projets très théoriques de recherche et développement. Cette thématique représente une opportunité pour les décideurs français de récupérer une place centrale dans la politique de l'eau au niveau européen : la France peut se targuer d'une concentration d'experts dans le monde de l'eau et compte parmi les plus grandes entreprises d'assainissement au monde et possède un savoir-faire centenaire dans la gestion de l'eau. Cependant, ce sujet ne représente pour le moment peu d'intérêt pour les responsables politiques nationaux, mis à part pour ceux dans l'urgence. Ce manque de considération est cependant en mutation, afin de faire face aux défis que représentent le changement climatique et l'explosion de la démographie.

Besoin d'une base de données nationale dédiée

Le développement de projets de recharge maitrisée des aquifères s'inscrit dans un paysage plus large incluant les mesures naturelles de rétention d'eau (NWRM) et les solutions fondées sur la nature (SFN). Or, l'absence actuelle d'une base de données centralisée recensant ces dispositifs constitue un frein majeur. Sans visibilité sur les dispositifs existants ou planifiés, il est difficile d'anticiper les interactions hydrologiques et hydrogéologiques entre dispositifs, ou l'impact plus général des dispositifs à l'échelle d'un bassin versant. Une base de données étendue à l'ensemble des territoires nationaux permettrait d'améliorer la planification, de faciliter les études d'impact cumulatif ainsi que de soutenir la prise de décision des autorités et des porteurs de projet. Cette base de données serait également un outil facilitant les retours d'expérience sur la mise en œuvre des systèmes de recharge maîtrisée des aquifères et la mise en contact des acteurs aidant à accroître l'efficacité, la durabilité des dispositifs et plus généralement les bonnes pratiques.

Les éléments réglementaires nécessaires à la mise en œuvre des dispositifs (déclaration et autorisation) pourraient constituer les éléments clés constitutifs d'une base de données numériques dédiée. Les mesures de fonctionnement, de contrôle et de surveillance des systèmes pourraient également faire l'objet des données partagées au fil du temps complétant la base de

données initiale. La mise en œuvre de ce type de base de données existe aujourd'hui pour différents dispositifs (captage d'eau et rejets par exemple) qui pourraient guider la réalisation de cette base de données dédiée aux systèmes de recharge maîtrisée des aquifères.

Par ailleurs la commission européenne a travaillé sur le concept de recharge surveillée et intentionnelle (MIR) pour aider les décideurs européens à mettre en place une réglementation garantissant une application sûre des techniques de recharge maîtrisée des aquifères (European Commission, 2024). Les blocs constitutifs du concept MIR (cf. Annexe 5 - Recommandations du Groupe de travail « Eaux souterraines » de la Stratégie commune de mise en œuvre (CIS)) pourraient également orienter la mise en œuvre de la base de données en considérant les différents aspects des systèmes de recharge maîtrisée des aquifères.

La diffusion de la connaissance et du fonctionnement des sites de recharge maîtrisée des aquifères via une base de données intégrant la dynamique opérationnelle et les données de contrôle et de surveillance est un point essentiel pour que tous les acteurs d'un territoire puissent élaborer et piloter les stratégies adaptées de gestion des eaux.

Une perception parfois ambiguë dans les débats sur la gestion de l'eau

La gestion des ressources en eau en contexte de changement climatique s'appuie sur un panel de solutions d'adaptation incluant les systèmes de recharge maîtrisée des aquifères qui s'inscrivent souvent dans des contextes où plusieurs usages de la ressource sont en concurrence et où les arbitrages sont fortement débattus. Certaines controverses pourraient ainsi porter sur les bénéficiaires des projets de recharge maitrisée, sur les coûts et/ou sur les processus de décision mais aussi sur l'aspect d'artificialisation des milieux ou sur l'accroissement des usages de l'eau incompatible avec des principes de sobriété associés aux changements de pratiques induites. Les problèmes potentiels d'acceptabilité sociale peuvent être liés à la perception des risques de contamination des eaux souterraines imputés à un traitement inadéquat ou à des défaillances opérationnelles, ainsi que les incertitudes relatives aux cadres réglementaires particulièrement ceux régissant la réutilisation des eaux usées. Pour les décideurs politiques, il est souvent mis en place une stratégie à plusieurs volets, comprenant l'établissement de réglementations claires et de normes de qualité de l'eau pour la réutilisation des eaux usées dans la recharge des aquifères, des investissements dans la recherche et des projets pilotes visant à optimiser les techniques de recharge, ainsi que des initiatives de participation du public destinées à renforcer la confiance et l'adhésion. Dans ces situations, l'expertise scientifique peut devenir elle-même un objet de débat et se retrouver au cœur de controverses qui dépassent largement le cadre technique. Mais les controverses susceptibles d'émerger ne portent pas uniquement sur la dimension technique et scientifique des projets. Elles reflètent également des visions divergentes de la gestion de l'eau, des conflits d'usage, des enjeux de justice sociale liés à la répartition des ressources ou encore des conceptions différentes de l'adaptation au changement climatique (Mankad *et al.*, 2015 ; Asprilla-Echeverria *et al.*, 2021 ; Beaudoin *et al.*, 2022 ; Bertrand *et al.*, 2022 ; Castro-Diaz *et al.*, 2026 ; Vozinaki *et al.*, 2026).

Les sciences humaines et sociales SHS pourraient donc être mobilisées pour accompagner la mise en œuvre des projets de recharge maitrisée. Leur vocation n'est pas de « faire accepter » les projets ni d'éviter les controverses. Il consiste plutôt à rendre intelligibles les différents points de vue qui s'opposent, à analyser les représentations sous-jacentes des dispositifs de recharge maitrisée, les mécanismes de confiance vis-à-vis du dispositif et des porteurs de projets, et les attentes des acteurs concernés. Les sciences sociales peuvent aussi aider à mettre en place de démarches participatives visant à concevoir des dispositifs de recharge maitrisée qui tiennent compte des attentes des différents acteurs.

Une expérience de projet pluridisciplinaire confirme également l'intérêt d'impliquer les SHS très en amont du projet, de manière à faire émerger les divergences de vue, avant qu'elles ne se cristallisent sous formes d'oppositions susceptibles de dégénérer en conflit. Les controverses autour de l'eau ne portent pas uniquement sur les connaissances scientifiques. En effet, elles reflètent des visions divergentes sur les priorités d'usage de la ressource, les modèles de développement des territoires, les principes de justice et les modalités de décision collective. **Une posture ouverte et apprenante permet de construire la confiance entre experts et acteurs non scientifiques qui est loin d'être acquise dans le contexte social actuel. E**n s'appuyant sur des retours d'expérience comme celui de l'étude du bassin des lacs du Born (Seguin *et al.*, 2024), différentes manières d'aborder les enjeux d'acceptabilité sociale dans le domaine de l'eau pourraient être inspirants lorsqu'il s'agit d'aborder la mise en œuvre de système de recharge maîtrisée des aquifères.

Dans cette étude du bassin des lacs du Born, en **initiant le projet par une consultation** des acteurs locaux, l'objectif était de recueillir leurs visions des impacts du changement climatique, des vulnérabilités générées et des solutions d'adaptation pouvant être mises en place. Cette phase a permis de créer un dialogue entre acteurs, scientifiques et décideurs publics à partir des préoccupations exprimées par les acteurs eux-mêmes. Les modèles hydrogéologiques développés par le BRGM ont ensuite été mobilisés pour répondre aux questions formulées collectivement et pour tester les stratégies d'adaptation identifiées au cours des échanges. **L'expertise scientifique est ainsi devenue un outil au service de la réflexion collective** plutôt qu'un cadre imposé à la discussion. Les participants ont souligné que cette démarche modifiait profondément la place du scientifique et du modélisateur hydrogéologue. Elle illustre une logique de co-construction dans laquelle les connaissances scientifiques et les savoirs territoriaux sont mobilisés conjointement pour élaborer des réponses adaptées aux enjeux locaux.

Recommandations du Groupe de travail « Eaux souterraines » de la Stratégie commune de mise en œuvre (CIS)

Les recommandations suivantes sont issues du document d'orientation sur la recharge maîtrisée des aquifères (MAR), élaboré dans le cadre de la stratégie commune de mise en œuvre (CIS) de la directive -Cadre sur l'eau et de la directive inondations (European Commission, 2024).

Ce document technique a permis d'analyser si le cadre réglementaire prévu par la Directive Cadre Européenne et la Directive eau souterraine est suffisant pour garantir la mise en œuvre d'une « recharge artificielle des aquifères » sûre. Le groupe de travail « Eaux souterraines » de la CIS estime que ces deux directives offrent un cadre juridique suffisamment solide pour réglementer la recharge maîtrisée des aquifères et qu'il n'est donc pas nécessaire d'adopter une nouvelle législation en la matière au niveau de l'UE. Le document technique vise à élaborer une approche commune pour répondre à l'exigence de la DCE relative à l' « autorisation préalable » pour les activités de recharge maîtrisée des aquifères. À cet égard, il est recommandé que des dispositions législatives soient adoptées au niveau des États membres afin de définir ce processus d'autorisation. Ces dispositions nationales devraient traiter les facteurs clés découlant des cadres d'évaluation des risques abordés dans le présent document d'orientation. En fonction du cadre juridique et réglementaire national, différents aspects de l'évaluation des risques pourraient être pris en compte par les processus d'autorisation ou les conditions découlant de la législation existante en matière d'eau, de la législation environnementale ou de la réglementation relative à l'approvisionnement en eau ou à la santé. En effet, la législation au niveau des États membres doit garantir la définition de l'analyse technico-scientifique approfondie minimale requise pour une caractérisation hydrogéologique appropriée et l'élaboration du cadre de surveillance nécessaire pour l'ensemble du système de recharge maîtrisée des aquifères. Cela s'explique également par la nécessité de veiller à ce que le système de recharge maîtrisée des

aquifères soit suffisamment souple pour tenir compte de la diversité des caractéristiques climatiques et hydrogéologiques prévalant dans les différents États membres.

À cet égard, il est fait référence au concept de recharge surveillée et intentionnelle (MIR), qui a été élaboré pour aider les décideurs européens à mettre en place une réglementation garantissant une application sûre des techniques de recharge maîtrisée des aquifères. Ce concept met davantage l'accent sur l'acceptation sociale et peut aider les États membres à formuler la législation mentionnée ci-dessus.

Les éléments constitutifs du modèle conceptuel MIR sont proposés en « blocs » applicables à tout système de recharge maîtrisée d'aquifères et repris dans la figure ci-dessous :

1. Sources d'eau pour la recharge maîtrisée des aquifères.
2. Conditions environnementales dans lesquelles se déroulent les activités de MAR, notamment le climat, le type d'aquifère, la géologie, le bassin hydrographique, la masse d'eau souterraine et la capacité d'épuration.
3. Technologie de recharge maîtrisée des aquifères.
4. Capteurs pour la collecte de données, permettant de caractériser les conditions environnementales et de surveiller le système.
5. Lignes directrices pour la surveillance de la quantité et de la qualité de l'eau, incluant les aspects relatifs à la fréquence et aux points d'échantillonnage.
6. Utilisation finale de l'eau récupérée, notamment l'irrigation, l'approvisionnement en eau, les barrières hydrauliques contre l'intrusion d'eau de mer, entre autres.
7. Aspects analytiques, avec des recommandations sur la portée et l'échelle des concentrations maximales autorisées de polluants potentiels.
8. Évaluation des risques, détaillant certains des risques à évaluer lors de la mise en œuvre d'opérations MAR, en tenant compte des habitats dépendants.
9. Autres, y compris des sujets pertinents difficiles à inclure dans les grands blocs précédents du MIR qui nécessitent d'être pris en considération, tels que la normalisation et l'interopérabilité, les contaminants émergents préoccupants, les aspects économiques, la participation du public, l'engagement actif des parties prenantes, etc.



Blocs constitutifs du modèle MIR – Monitored and Intentional Recharge (European Commission, 2024)

Le groupe de travail met en avant la question de la gestion des données produites en grande quantité par le programme de surveillance des systèmes de recharge maîtrisée des aquifères et dont l'interopérabilité est un enjeux clé. En effet la diversité des données (mesures sur site ou en laboratoire, en ligne ou non, résultats de modélisation, …) et les enregistreurs de données de différents fabricants stockent et récupèrent les informations dans divers formats pouvant varier considérablement ce qui nécessite des efforts supplémentaires conséquents pour intégrer et analyser les données.

Enfin, les discussions menées lors de la rédaction du document technique ont mis en évidence la question de la recharge aquifère non intentionnelle, à savoir lorsque la recharge aquifère résulte d'un effet secondaire d'activités destinées à d'autres fins que la recharge. Dans de tels cas, la dérogation prévue à l'article 6, paragraphe 3, de la directive eau souterraine ne devrait pas s'appliquer et, par conséquent, toutes les dispositions de l'article 6 de ladite directive devraient s'appliquer. Il est donc recommandé que le groupe de travail «Eaux souterraines» du CIS mène une action supplémentaire afin d'analyser le cadre réglementaire applicable à ces activités de recharge non intentionnelle des aquifères et de fournir des orientations aux États membres sur l'application de l'article 6 de la directive-cadre sur les eaux souterraines; cela afin de garantir que ces activités et mesures puissent être mises en œuvre de manière sûre, en préservant l'état des ressources en eaux souterraines et des écosystèmes qui en dépendent.

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr