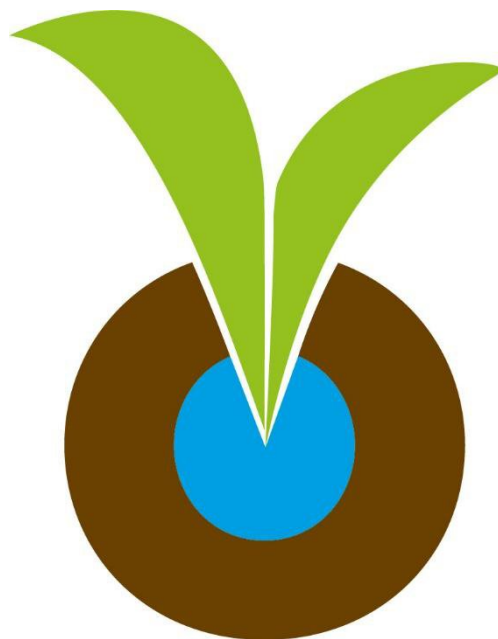


# **Vulnérabilité des aquifères face au changement climatique**

**Recommandations et bonnes pratiques pour la  
gestion des ressources en Eau Souterraine**



Document préparé pour l'action COST CA19120 : WATer isotopes in the critical zONE from groundwater recharge to plant transpiration (WATSON) (Isotopes de l'eau dans la zone critique, de la recharge des eaux souterraines à la transpiration des plantes)

<https://watson-cost.eu/>

2024, WATSON, Université de Florence, Italie

Rédigé par :

Konstantinos Voudouris (Université Aristote de Thessalonique, Grèce)

Manuel Sapiano (Agence de l'énergie et de l'eau, Malte)

avec des contributions de :

Miriam Coenders-Gerrits, (Université technologique de Delft, Pays-Bas) Marina Gillon (Université d'Avignon, France)

Tugbanur Ozen Balaban (Université d'Izmir Katip Celebi, Turquie) Gabriele Chiogna (Geozentrum Nordbayern, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Allemagne)

Ilja van Meerveld (Université de Zurich, Suisse)

Cette publication est basée sur les travaux de l'action COST WATSON, CA19120, soutenue par COST (Coopération européenne en science et technologie).

COST (Coopération européenne en science et technologie) est une agence de financement pour les réseaux de recherche et d'innovation. Nos actions contribuent à relier les initiatives de recherche à travers l'Europe et permettent aux scientifiques de développer leurs idées en les partageant avec leurs pairs. Cela stimule leur recherche, leur carrière et l'innovation.

[www.cost.eu](http://www.cost.eu)



Funded by  
the European Union

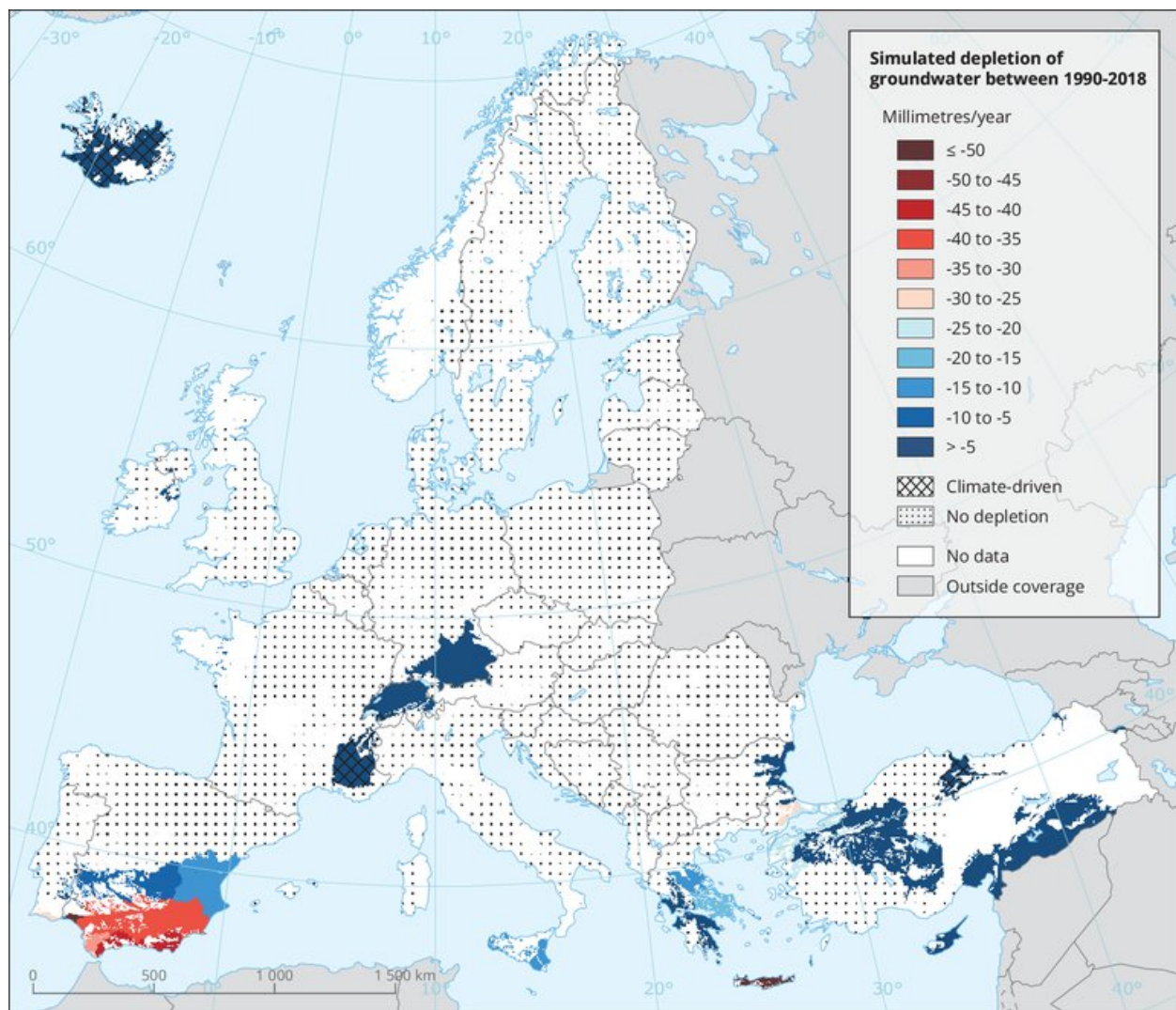
## Introduction

Les eaux souterraines sont une ressource naturelle précieuse et sont essentielles pour satisfaire les besoins en eau pour les usages domestiques, industriels et agricoles, ainsi que pour assurer les besoins des écosystèmes terrestres dépendant des eaux souterraines. Les eaux souterraines sont particulièrement importantes dans les pays touchés par un manque de précipitations pendant la saison sèche. Au niveau mondial, les eaux souterraines fournissent environ 26 % de l'approvisionnement en eau potable, 42 % de l'eau utilisée en agriculture pour l'irrigation et 24 % de l'eau destinée aux besoins industriels directs (AIH, 2016). Les principaux systèmes aquifères en Europe sont développés dans des sables, des graviers, des grès, des conglomérats pour les aquifères poreux et dans des calcaires, des calcaires dolomitiques et des marbres pour les aquifères karstiques.

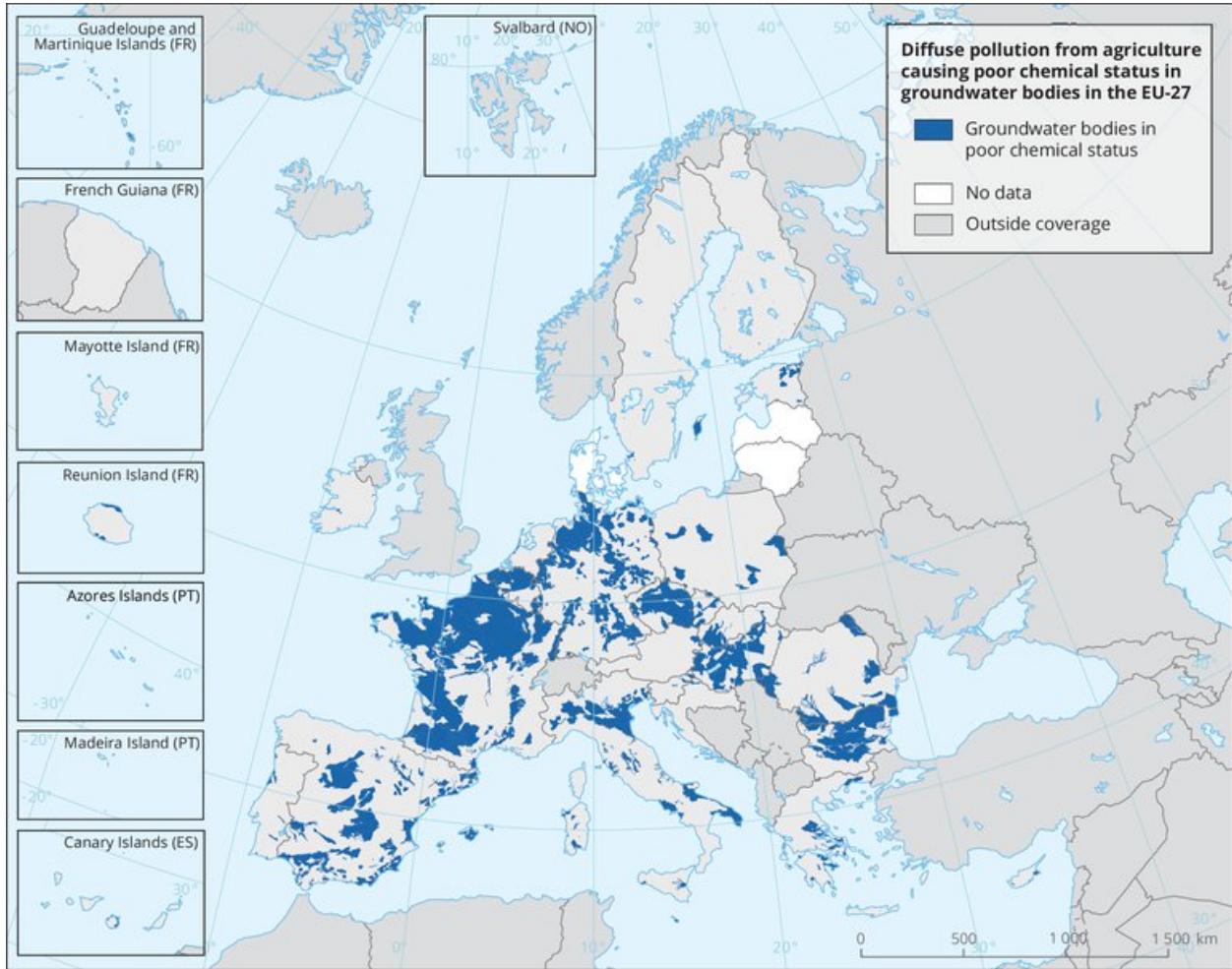
Les eaux souterraines sont soumises à de nombreuses pressions, qui sont exacerbées par les changements d'utilisation et d'occupation des sols, notamment l'urbanisation, l'augmentation de la demande de production alimentaire, la détérioration de la qualité de l'eau, la mauvaise gestion de l'usage de l'eau et la crise climatique. Ces pressions se traduisent par une surexploitation des eaux souterraines (due à la pénurie naturelle d'autres ressources en eau pendant la saison sèche et/ou à l'exploitation inadéquate des eaux de surface et de source) et une baisse du niveau des nappes d'eaux souterraines, combinée à une réduction des réserves (bilans hydriques négatifs/déficitaires). Les figures 1 et 2 présentent respectivement deux cartes illustrant la baisse du niveau des nappes d'eaux souterraines et la pollution des masses d'eau souterraines par l'agriculture en Europe (données de l'Agence européenne pour l'environnement, <https://www.eea.europa.eu>). Elles montrent que de nombreux aquifères sont affectés par une dégradation de la qualité de leurs eaux. Cette dégradation est principalement caractérisée par la salinisation des eaux due à l'intrusion de l'eau de mer, conséquence directe de la surexploitation des eaux souterraines et qui sera potentiellement exacerbée par l'élévation du niveau de la mer. La pollution par les nitrates, les pesticides et d'autres contaminants due à l'utilisation d'engrais et de produits agrochimiques représente une deuxième source importante de la dégradation de la qualité des eaux. Une autre source de pollution des eaux souterraines est le déversement incontrôlé d'eaux usées domestiques et industrielles non traitées dans les eaux de surface, et/ou les fuites des fosses septiques et des égouts municipaux dans l'environnement. La contamination des eaux souterraines est fréquente dans les zones densément peuplées et dans les zones d'activité agricole et industrielle intensive (WWDR 2022). En outre, un pompage excessif prolongé peut contribuer à l'affaissement des sols en abaissant de manière significative le niveau des nappes phréatiques dans les aquifères alluviaux, causant des dommages aux réseaux d'approvisionnement en eau et aux infrastructures de surface, y compris les routes.

Bien que les eaux souterraines soient plus résilientes au changement climatique que de nombreuses ressources en eau de surface (Amobichukwu et al, 2020), elles restent vulnérables, car la recharge des systèmes aquifères évoluera. En effet, il a été souligné que la crise climatique

(inondations, sécheresses, diminution des précipitations) et la prévalence d'événements climatologiques extrêmes qui en découle, affecteront le cycle de l'eau et, par conséquent, la recharge naturelle des eaux souterraines. La notion de vulnérabilité est souvent utilisée pour décrire les impacts potentiels (négatifs) du changement climatique sur les eaux souterraines. Selon Nistor (2020), les zones présentant une vulnérabilité élevée à très élevée des eaux souterraines au changement climatique sont réparties dans le centre et le nord-ouest de l'Europe, au sud des îles britanniques, dans les zones agricoles et les grandes plaines (plaine d'Europe du Nord, plaine du Pô, plaine de Roumanie), tandis que des classes de vulnérabilité moyenne, faible à très faible ont été identifiées pour les zones montagneuses et vallonnées (figure 3). Ces résultats suggèrent également que la qualité et la quantité des eaux souterraines en Europe sont soumises non seulement à la pression du changement climatique (par exemple, réduction de la disponibilité de l'eau) mais aussi aux activités humaines (par exemple, les décharges, l'agriculture et les pratiques d'irrigation).

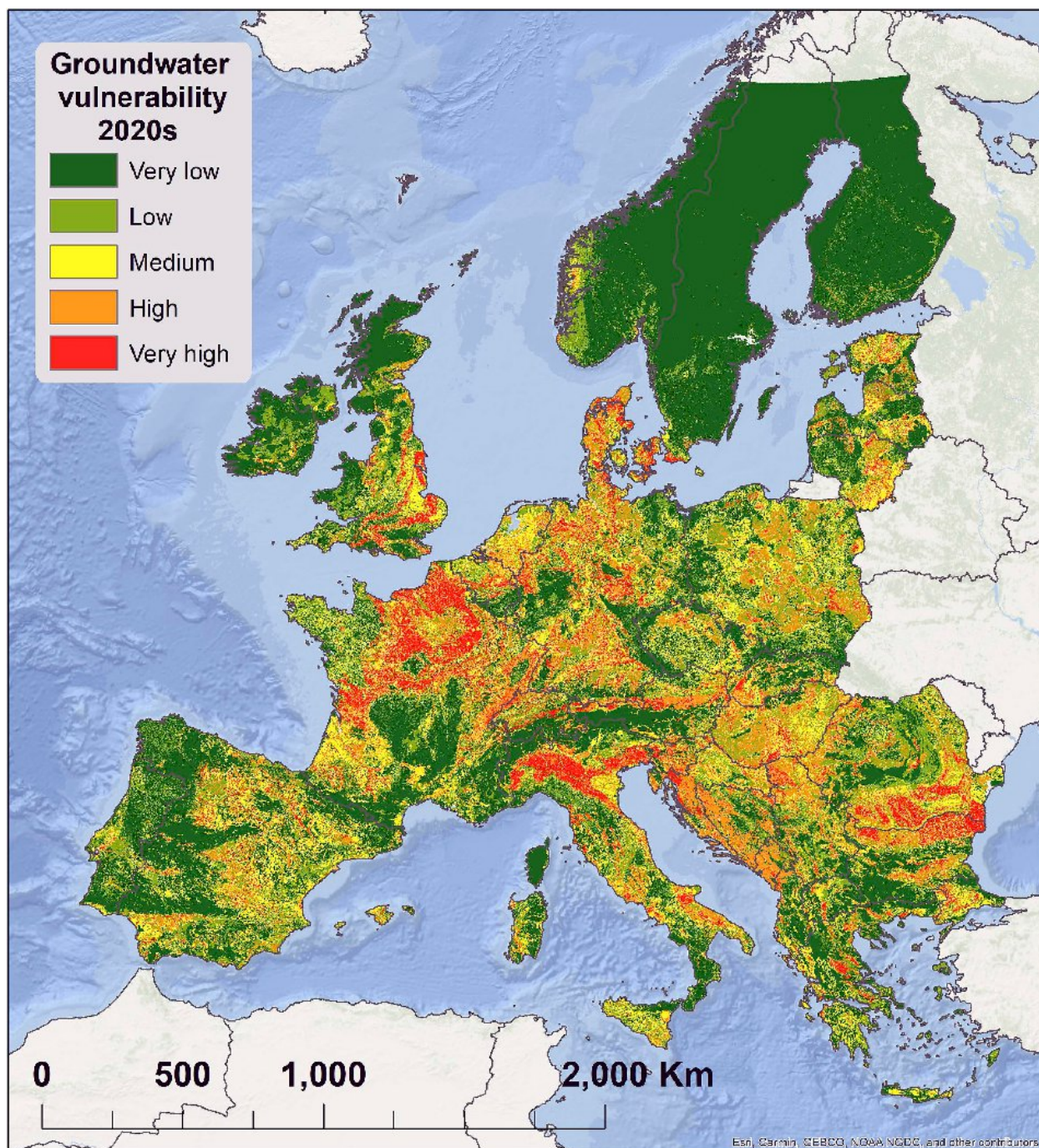


**Figure 1** : Baisse du niveau des eaux souterraines entre 1990 et 2018 en Europe (Source : AEE, <https://www.eea.europa.eu>).



**Figure 2** : Pollution d'origine agricole dans les masses d'eau souterraine en Europe (Source : AEE, <https://www.eea.europa.eu>).





**Figure 3** : Carte de vulnérabilité des eaux souterraines en Europe pour la période actuelle (années 2020).

(Source : Nistor, 2020).

## Recommandations et bonnes pratiques

Les eaux souterraines peuvent nous aider à nous adapter à la crise climatique et à protéger les écosystèmes. Pour se faire, elles doivent être exploitées rationnellement et gérées durablement. L'eau est au cœur de l'économie circulaire. L'accent doit être mis sur cette économie circulaire, en commençant par la réutilisation des eaux usées. La restauration des systèmes aquifères grâce à des solutions telles que la recharge artificielle - contre balançant l'impact des événements extrêmes et garantissant ainsi la durabilité des eaux souterraines - joue un rôle tout aussi important. L'interaction entre l'usage des sols et la recharge des eaux souterraines, ainsi que la protection des nappes d'eau souterraine, joue également un rôle important dans la gestion des ressources en eau souterraine. Par exemple, le projet européen PROLINE-CE (<https://programme2014-20.interreg-central.eu/Content.Node/PROLINE-CE.html>) a identifié des pratiques de gestion de l'usage des sols qui peuvent être mises en œuvre en mettant l'accent sur la protection de l'eau potable. En outre, dans le cadre de la gestion intégrée des ressources en eau, les pratiques de gestion des inondations et des sécheresses peuvent être construites en tenant compte de leur incidence sur les eaux souterraines. Enfin, une adaptation des orientations politiques est également nécessaire pour permettre une mise en œuvre efficace des actions requises pour une meilleure gestion des ressources en eau souterraine.

Les recommandations suivantes (Findidakis et Sato, 2011 ; Voudouris, 2024) permettent d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau et de la durabilité des eaux souterraines grâce à l'application du principe des 5R (réduire, réutiliser, récupérer, recycler, reconstituer), comme le montre le tableau 1 :

1. L'utilisation simultanée des eaux de surface et des eaux souterraines permettrait de maximiser l'efficacité de l'utilisation de l'eau et de répondre à la demande croissante d'eau d'irrigation (gestion de la demande). Il est à noter qu'une protection efficace des eaux souterraines peut être obtenue en ne les considérant pas isolément, mais dans un cadre de gestion intégrée qui inclut également les eaux de surface et d'autres ressources en eau alternatives (non conventionnelles).
2. Mettre l'accent sur des réseaux de surveillance représentatifs des hydrosystèmes considérés afin de recueillir des données fiables, en temps réel et afin de développer la capacité d'interpréter ces données de surveillance: Engagement réel et efficace des parties prenantes - diffusion de l'information, sensibilisation et participation des parties prenantes - et garantie que l'information leur est présentée d'une manière compréhensible. Les données sur les études de recharge des eaux souterraines, les cartes présentant les sites d'échantillonnage où ont été analysés les isotopes stables de l'eau sont disponibles sur le site web WATSON (<https://watson-cost.eu>).
3. Construction de petits barrages d'interception dans les principaux torrents pour retarder les écoulements torrentiels et augmenter la recharge des eaux souterraines (gestion de

l'offre), après une évaluation de l'impact écologique et en tenant compte des conditions locales.

4. Réduire l'usage d'eau d'irrigation en utilisant des techniques d'économie d'eau. Dans tous les cas, les méthodes d'irrigation doivent être adaptées au climat, à la culture et au type de sol. Les données isotopiques peuvent aider à déterminer la source d'eau utilisée par la végétation (WATSON WG2).
5. Réutiliser les eaux usées traitées dans le cadre de l'économie circulaire afin de réduire la quantité d'eau qui se déverse en mer et dans l'environnement et afin de fournir de l'eau pour l'irrigation, en particulier dans les régions où l'eau est rare.
6. Adopter des politiques de tarification qui garantissent un niveau de recouvrement des coûts (y compris les coûts liés aux ressources et à l'environnement) suffisant pour encourager une utilisation efficace des ressources en eau. Proposer des incitations économiques pour promouvoir la restauration et l'utilisation efficace des ressources en eau douce naturelles. Prévenir la surexploitation des aquifères en fixant des limites de prélèvements.
7. Appliquer les meilleures pratiques agricoles pour réduire l'utilisation d'engrais et de produits agrochimiques. Cela signifie qu'il faut utiliser le bon type et la bonne dose d'engrais sur le bon sol pour une culture donnée et au bon moment. Dans le cadre de l'action COST WATSON, un document de synthèse sur l'utilisation des données isotopiques sur les nitrates a été publié (Matiatos et al., 2023).
8. Adopter un ensemble de stratégies de gestion approprié au bassin hydrographique considéré, qui tient compte des eaux souterraines dans un cadre de gestion globale. Ces stratégies comprennent des mesures de conservation de l'eau, une réglementation des développements existants, une amélioration de la législation existante, l'éducation et la sensibilisation du grand public.
9. Gérer les inondations et les sécheresses dans le cadre des plans de gestion intégrée des bassins hydrographiques par la construction d'infrastructures appropriées, par exemple des barrages de contrôle des inondations, de petits barrages d'interception dans les torrents des zones montagneuses, des réservoirs de stockage d'eau, etc.
10. Évaluer la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution externe et délimiter des périmètres de protection autour des forages et des sources exploités pour la production d'eau potable (quantité suffisante et qualité acceptable).
11. La gestion durable des eaux souterraines est une question de sécurité nationale et internationale, car certains aquifères sont transfrontaliers. Cela implique la nécessité d'une coopération entre les pays concernés pour résoudre les conflits.
12. Assurer une gestion durable et efficace de l'eau grâce à l'"eau numérique", avec des incidences positives sur la qualité et la quantité, notamment en développant des dispositifs et des capteurs intelligents, des réseaux intelligents et des analyses de données avancées (Water Europe, 2020).



**Tableau 1** : Correspondance entre les 12 recommandations et le modèle du principe des 5R.

Pas de Rec.	Réduire	Réutiliser	Récupérer	Recycler	Reconstituer
1	+		+		
2	+			+	
3			+		+
4	+				
5		+			
6			+		
7	+				
8			+		+
9					+
10					
11					
12					

## Conclusion

Les eaux souterraines sont une source d'eau fiable, mais leur gestion et leur gouvernance sont très complexes. L'intelligence humaine et le développement spectaculaire des hydrotechnologies (drones, SIG, télédétection, satellites, Internet des objets (IoT), science citoyenne, eau numérique et modélisation-simulation de l'écoulement des eaux souterraines) sont des garanties de la capacité de l'humanité à s'adapter à la crise climatique à l'avenir. C'est pourquoi les gouvernements, les scientifiques et la société dans son ensemble doivent redoubler d'efforts pour protéger les ressources en Eau Souterraine pour le bien-être de la planète et la dignité de la vie humaine.

## Références

Amobichukwu C. Amanambu, Omon A. Obarein, Joann Mossa, Lanhai Li, Shamusideen S. Ayeni, Olalekan Balogun, Abiola Oyebamiji, Friday U. Ochege (2020). Groundwater system and climate change : Present status and future considerations, *Journal of Hydrology*, 125163, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125163>.

Agence européenne pour l'environnement (AEE). <https://www.eea.europa.eu>.

Findidakis, A.N., Sato, K. (2011). Pratiques de gestion des eaux souterraines. Monographie de l'IAHR, UNESCO-PHI, CRC Press/Balkema.

Association internationale des hydrogéologues (AIH) (2016). eNews. [www.iah.org](http://www.iah.org)

- Matiatos, I., Moeck, C., Vystavna, Y., Marttila, H., Orłowski, N., Jessen, S., Evaristo, J., Sebilo, M., Koren, G., Dimitriou, E., Müller, S., Panagopoulos, Y., Stockinger, M.P. (2023) Nitrate isotopes in catchment hydrology : insights, ideas and implications for models. *Journal of Hydrology* 130326. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130326>
- Nistor, M.-M. (2020). Groundwater vulnerability in Europe under climate change (Vulnérabilité des eaux souterraines en Europe dans le contexte du changement climatique). *Quaternary International*, Vol. 547, 185-196.
- Rapport mondial des Nations unies sur la mise en valeur des ressources en eau, WWDR (2022). Les eaux souterraines, rendre l'invisible visible. <https://www.unesco.org/reports/wwdr/2022/en>
- Voudouris, K. (2024). Le rôle des eaux souterraines dans l'adaptation à la crise climatique en Grèce. *Elgar Encyclopedia of Water Policy, Economics and Management*, chapitre 62, 271-276. Édité par Koundouri Ph. et Alamanos, A.
- Eau Europe (2020). Une société intelligente dans le domaine de l'eau pour un plan de relance post-COVID-19 réussi. <https://watereurope.eu>

# WATSON



## COST ACTION

<https://watson-cost.eu/foac/>



Funded by  
the European Union