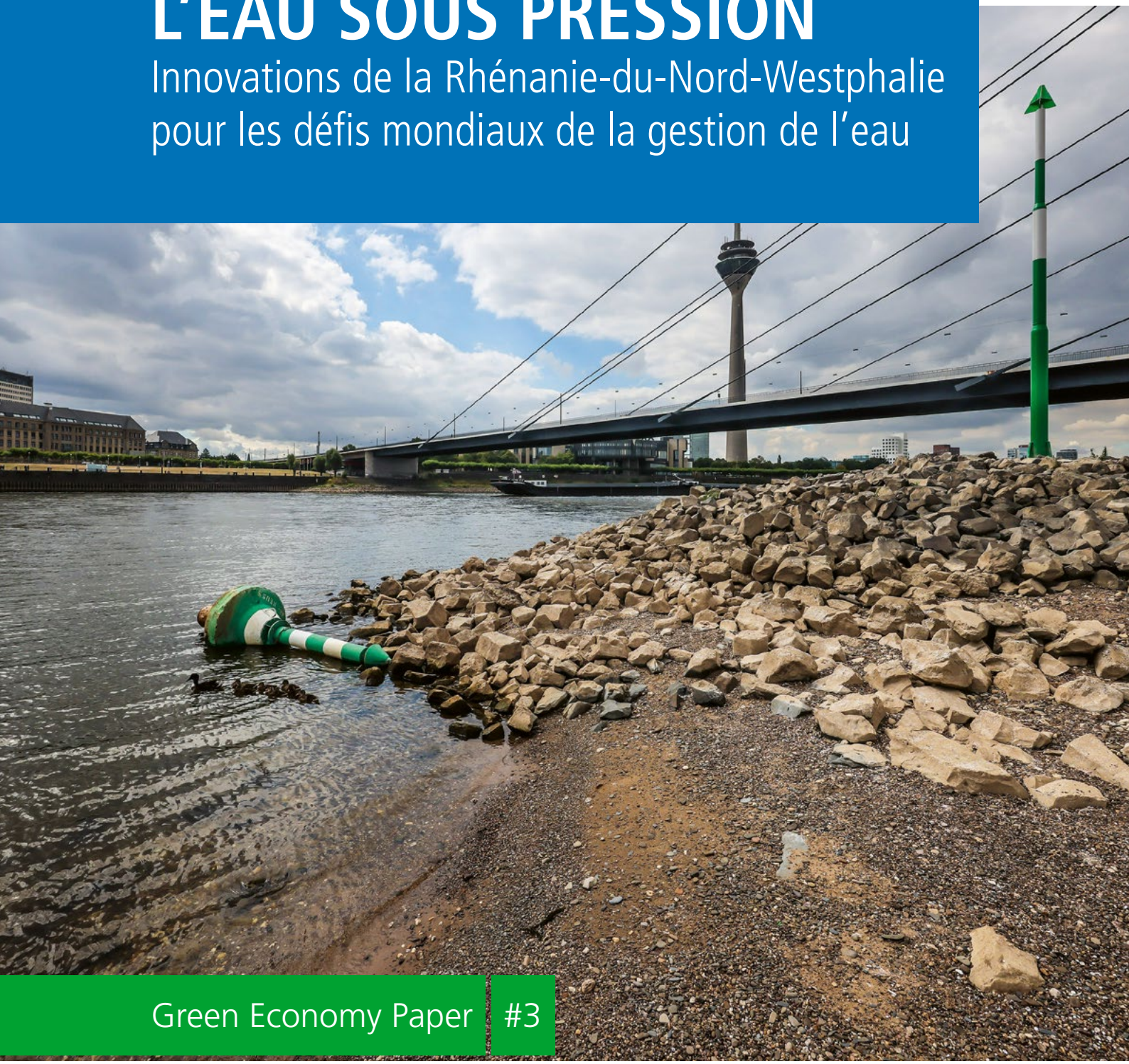
Green Economy
Network.NRW

L'EAU SOUS PRESSION

Innovations de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie pour les défis mondiaux de la gestion de l'eau



Green Economy Paper #3

A Measure of the Green Economy Strategy
green economy
Leading in North Rhine-Westphalia

On behalf of
Ministry of the Environment,
Nature and Transport
of the State of North Rhine-Westphalia

Photo de couverture : Les faibles niveaux d'eau du Rhin posent de plus en plus souvent des défis majeurs à la navigation intérieure et aux communes.

Préface du ministre Oliver Krischer

Chers lecteurs, chères lectrices,

A l'heure où la protection de la nature, de l'environnement et du climat est de plus en plus remise en question, même par des responsables politiques du monde entier, il est d'autant plus important de rappeler que notre vie et notre prospérité matérielle dépendent directement d'un environnement intact, de la stabilité du climat et d'une grande diversité de la nature. Aucun domaine n'illustre mieux cette réalité que celui de l'eau. L'eau joue un rôle central dans notre société. Elle est un aliment de base et une condition préalable à toute forme d'agriculture. Elle est une ressource de production, une voie de transport, une source et un réservoir d'énergie. Malheureusement, nous ne pouvons que constater que dans tous ces domaines la ressource en eau est soumise à une pression croissante. Ainsi, la dépendance à l'eau devient de plus en plus un risque pour notre développement futur.

Les raisons en sont multiples : les microplastiques, les micropolluants et les produits chimiques éternels posent de nouveaux défis aux stations d'épuration. L'augmentation constante de l'imperméabilisation des sols contribue au risque d'inondation. La fertilisation excessive entraîne des taux élevés de nitrates dans les eaux souterraines. Les conséquences de la crise climatique accélèrent cette évolution de manière fatale. Les sécheresses persistantes et les précipitations extrêmes sont de plus en plus fréquentes et deviennent un danger naturel pour l'homme. Elles constituent un facteur de stress et une épreuve difficile pour des économies entières.

Le Land de Rhénanie-du-Nord-Westphalie se prépare à ces scénarios, notamment avec la « stratégie d'avenir pour l'eau » en cours d'élaboration. De nombreuses entreprises du secteur de l'environnement prennent leurs responsabilités dans cette situation. Leurs technologies protègent et préservent la ressource en eau – par exemple en aidant à développer l'infrastructure bleue et verte dans les centres urbains, en permettant des méthodes innovantes de traitement des eaux usées et en ouvrant de nouvelles voies à l'agriculture en matière d'irrigation. La gestion de l'eau qui fait partie de l'économie de l'environnement et qui joue un rôle clé dans les services publics, contribue de manière décisive à la gestion durable et résiliente au changement climatique de la ressource en eau. Pour continuer à jouer ce rôle à l'avenir, les entreprises de gestion de l'eau misent systématiquement sur la recherche et le développement. Dans ce contexte, le troisième Green Economy Paper identifie les tendances technologiques de la recherche internationale sur la gestion de l'eau et met en évidence les priorités de la recherche en Rhénanie-du-Nord-Westphalie. Il classe les nouvelles possibilités qui découlent des innovations pour la gestion de l'eau et propose des solutions possibles à ses principaux défis.

Le résultat montre que la Rhénanie-du-Nord-Westphalie, à l'intersection d'une gestion de l'eau bien établie et d'un paysage de recherche profilé, contribue aujourd'hui de manière déterminante à développer des solutions d'avenir pour les grandes questions liées à l'eau. Ce faisant, nous portons notre regard au-delà des frontières de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie, apprenons également des autres acteurs et concluons des coopérations avec des partenaires du monde entier. Car ce n'est qu'ensemble que nous pourrons relever les grands défis de la gestion future de notre ressource la plus importante.

Je vous souhaite une lecture inspirante et espère que ce document de réflexion favorisera la poursuite des échanges entre les acteurs concernés en Rhénanie-du-Nord-Westphalie et bien au-delà.

Oliver Krischer
Ministre de l'Environnement, de la Protection de la nature et des Transports du Land de Rhénanie-du-Nord-Westphalie

Avertissement relatif à l'utilisation de l'intelligence artificielle (IA)

Un outil d'IA développé par Prognos AG a été utilisé pour élaborer le présent Green Economy Paper #3. Grâce à différents algorithmes (basés sur l'IA), notamment des algorithmes de clustering, des procédés d'apprentissage automatique et des modèles de langage à grande échelle, des millions de points de données ont été systématisés, compilés et évalués. Cette approche basée sur l'IA a permis d'identifier et d'analyser plus de 200 000 publications scientifiques liées à la gestion de l'eau pour la période 2020–2024. Cette approche a permis de créer une base de données pour identifier les tendances et les évolutions technologiques liées à la gestion de l'eau, sur laquelle se fondent les réponses apportées dans le présent document. Cette approche permet d'une part de prendre en compte une grande quantité de données et, d'autre part, de décomposer si nécessaire les publications qui se cachent derrière chaque thème. Les éventuelles imprécisions ou ambiguïtés de certains résultats ont été compensées par la quantité de données analysées par l'IA et par la vérification des données par les collaborateurs du KNUW.NRW. Cette vérification comprenait un examen de la pertinence des résultats, réalisé de manière indépendante par cinq experts, ainsi qu'une vérification des premières évaluations des résultats avec des experts dans le cadre d'un dialogue lors du 8e SUMMIT Umweltwirtschaft.NRW en novembre 2024. Enfin, il convient de noter que l'intelligence artificielle a été utilisée exclusivement pour la génération de la base de données. L'évaluation de la base de données ainsi que tous les textes, conclusions et illustrations ont été réalisés par des personnes.

Table des matières

Préface du ministre Oliver Krischer 3

1 Introduction 6

2 Méthodologie : comment l'IA aide à identifier les tendances en matière de recherche et de développement dans la gestion de l'eau 10

2.1 L'IA comme outil d'identification des innovations dans la gestion de l'eau 11
2.2 Détermination des défis pour la gestion de l'eau 13

3 Défis de la gestion de l'eau et solutions issues de la recherche 15

3.1 Pénurie d'eau et protection des ressources mondiales 17
3.2 Risques liés aux entrées de matières et autres substances polluantes 20
3.3 Protection des écosystèmes aquatiques 24
3.4 Adaptation des infrastructures hydrauliques au climat 27
3.5 Utilisation des sols compatible avec l'eau et résiliente au climat en ville et à la campagne 29

4 Mégatendances et technologies dans la gestion de l'eau 33

4.1 Technologies de numérisation 34
4.2 Technologies de traitement de l'eau 35
4.3 Technologies d'efficacité hydrique 36
4.4 Technologies de durabilité 37

5 Classement des résultats par rapport à la Rhénanie-du-Nord-Westphalie : associer les innovations aux stratégies politiques et aux structures existantes 38

5.1 Fonctions liées à la gestion de l'eau en période de crise climatique 39
5.2 Traitement des eaux usées et infrastructures hydrauliques 41
5.3 Promouvoir la coopération en Rhénanie-du-Nord-Westphalie ainsi qu'avec des partenaires internationaux 42
5.4 Excellence numérique dans la gestion de l'eau 43

6 Invitation au dialogue : analyse des résultats 46

Liste des notes finales 47

Mentions legales 53

1 Introduction

Le barrage de Bigge dans le Sauerland est l'un des plus grands réservoirs d'Allemagne

L'eau est l'une de nos ressources les plus précieuses et les plus variées – tant pour répondre aux besoins humains fondamentaux que pour le développement économique et social. On estime qu'environ « 78 % des emplois à l'échelle mondiale dépendent de l'eau, dont environ la moitié dans une large mesure ».[1]

Il s'agit non seulement de secteurs économiques directement liés à l'eau, comme l'approvisionnement en eau potable ou le traitement de l'eau, mais aussi de secteurs qui dépendent fortement de l'eau comme l'agriculture, la pêche, la navigation, l'énergie, l'industrie ou même le secteur tertiaire. En outre, 60 % du produit intérieur brut mondial est dû à des processus dans lesquels l'eau est indispensable.[2] En Rhénanie-du-Nord-Westphalie (NRW) également, une région à la performance économique élevée, au fort degré d'industrialisation et à la densité de population élevée, l'importance économique de cette précieuse matière première se manifeste en particulier dans les secteurs à forte consommation d'eau comme la production de métaux et l'industrie chimique.

A l'échelle mondiale, ce sont déjà les thèmes du quotidien qui soulèvent des questions essentielles sur la ressource en eau. En Allemagne, chaque personne consomme en moyenne près de 130 litres d'eau potable par jour pour son hygiène corporelle et ses soins quotidiens qui consistent à se brosser les dents, à prendre une douche, à faire sa toilette, à cuisiner et à laver ses vêtements.[3] En comparaison mondiale, seule une minorité de personnes peut se le permettre. Si l'on regarde par exemple dans le Sud, on constate une pénurie d'eau relativement importante. Si aucune mesure n'est prise dès aujourd'hui pour remédier à cette pénurie, le Forum économique mondial estime qu'environ 1,6 milliard de personnes pourraient vivre sans accès garanti à l'eau potable en 2030.[4] Le fait que l'Italie et l'Espagne limitent déjà l'utilisation de l'eau pendant les mois d'été montre que l'Europe sera également plus touchée dans un avenir proche.[5]

Dans le contexte de la grande importance de la ressource en eau, le présent Green Economy Paper du réseau de compétences en économie de l'environnement de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie (Kompetenznetzwerk Umweltwirtschaft KNUW.NRW) présente les tendances en matière d'innovation de la recherche internationale sur la gestion de l'eau* ainsi que les points forts de la recherche en Rhénanie-du-Nord-Westphalie qui ont été identifiés par le biais d'une approche innovante basée sur l'IA combinée à une approche qualitative. Pour ce faire, le document classe dans quelle mesure les tendances technologiques identifiées constituent des approches de solution pour les défis suivants : (1) pénurie d'eau et protection des ressources mondiales, (2) protection des écosystèmes aquatiques, (3) risques liés aux entrées de matières et autres substances polluantes, (4) adaptation des infrastructures de l'eau au climat, (5) utilisation des sols compatible avec l'eau et résiliente au climat en milieu urbain et rural. Le choix des défis se base sur une évaluation qualitative structurée des stratégies politiques pertinentes du Land de Rhénanie-du-Nord-Westphalie, de l'État fédéral ainsi qu'au niveau international.

Sur la base de l'analyse effectuée, basée sur l'IA, il a été possible de déduire, outre les approches de solution pour les cinq défis, les mégatendances mondiales de la gestion de l'eau. Il s'agit de domaines thématiques prioritaires qui peuvent être considérés comme une intersection de champs de recherche avec une dynamique élevée. Au total, quatre mégatendances ont pu être identifiées : (1) les technologies de numérisation, (2) les technologies de traitement de l'eau, (3) les technologies d'efficacité hydrique (4) les technologies de durabilité. Ces quatre tendances sont présentées en détail au chapitre 4.

Enfin, les résultats obtenus dans le document sont classés et mis en relation avec les structures et stratégies politiques pour le contexte de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie. Quatre sections thématiques – (1) les fonctions de la gestion de l'eau à l'heure du changement climatique, (2) l'épuration des eaux usées et les infrastructures hydrauliques, (3) la coopération en Rhénanie-du-Nord-Westphalie et avec des partenaires internationaux et (4) l'excellence numérique dans la gestion de l'eau – proposent des points de départ pratiques permettant de placer les innovations scientifiques dans des contextes pratiques et de réaliser ainsi des objectifs politiques.

Pour identifier les tendances de l'innovation dans la gestion de l'eau, le KNUW a utilisé un outil innovant basé sur l'IA qui a permis d'examiner systématiquement plus de 200.000 publications scientifiques et d'identifier les thèmes d'innovation prioritaires qui ont le potentiel de marquer le domaine de la recherche et du développement dans la gestion de l'eau au cours des prochaines années.

* En Rhénanie-du-Nord-Westphalie et en Allemagne, l'approvisionnement de l'économie et de la société en eau de qualité suffisante est assuré par la gestion de l'eau. Celle-ci inclut l'approvisionnement en eau, l'évacuation des eaux usées, la protection contre les inondations et la protection des écosystèmes aquatiques.

Un indicateur central de l'importance qu'un thème peut prendre à l'avenir est le « Future Score » attribué par l'outil, qui permet de quantifier le potentiel de développement d'un thème. Les résultats globaux ont en outre été évalués par rapport à l'activité de recherche en Rhénanie-du-Nord-Westphalie. Il a ainsi été possible de déterminer comment les instituts de Rhénanie-du-Nord-Westphalie sont impliqués dans la recherche mondiale, quels sont les champs thématiques présents en Rhénanie-du-Nord-Westphalie et quels sont les contenus qui ne sont pas suivis. Il en ressort notamment le domaine de la technologie des membranes pour la purification de l'eau ainsi que la prévision des conditions météorologiques extrêmes sur la base de l'IA, domaines dans lesquels la Rhénanie du Nord-Westphalie occupe une position de précurseur.

L'examen commun des défis et des approches de solutions en Rhénanie-du-Nord-Westphalie et au niveau international est particulièrement pertinent dans le domaine de la gestion de l'eau. Certes, le monde se distingue considérablement par l'acuité avec laquelle les régions sont touchées par les défis. Néanmoins, la gestion de l'eau est confrontée à des tâches futures similaires à l'échelle mondiale. La question de savoir comment et par qui la ressource en eau est gérée – c'est-à-dire qui remplit les tâches assumées par la gestion de l'eau en Allemagne – reçoit également des réponses différentes. La Rhénanie-du-Nord-Westphalie compte parmi les régions les plus riches en eau de l'UE et est également très bien placée en termes d'infrastructure par rapport à d'autres pays. Mais le fait est que les hommes, les systèmes économiques et les écosystèmes du monde entier sont reliés entre eux par le cycle global de l'eau. C'est pourquoi les scientifiques du monde entier recherchent des approches innovantes* qui contribuent de manière décisive à la résolution de ces défis. Le présent document contribue à déterminer lesquelles de ces approches présentent un potentiel de développement élevé pour les défis internationaux pertinents.

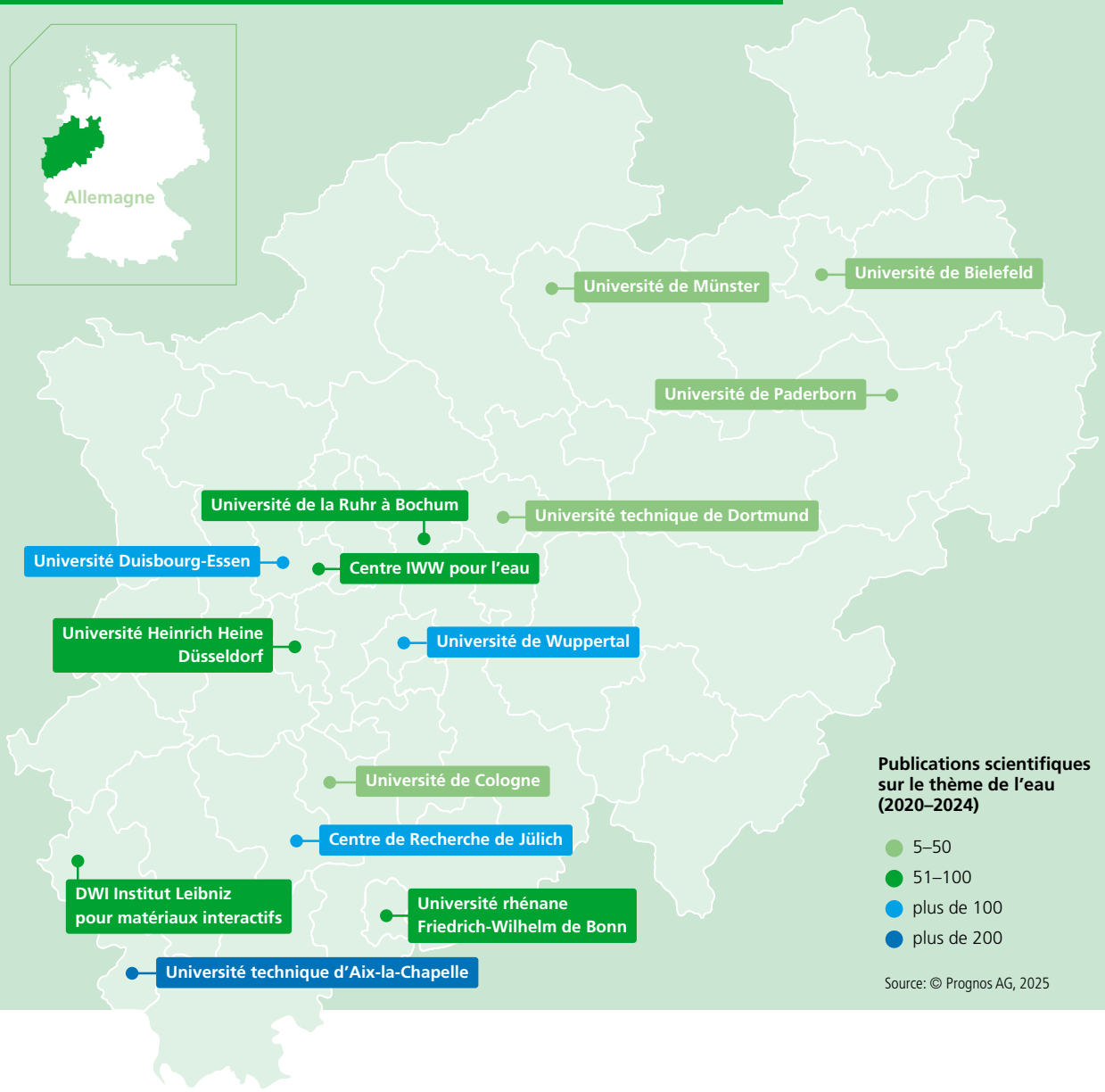
* Dans le contexte du présent document, on entend par approches innovantes celles qui a) améliorent un produit existant ou facilitent sa fabrication, ou b) développent de nouveaux produits, procédés ou bases (scientifiques) pour relever les défis de la gestion de l'eau.

La ville de Bochum surveille la qualité des eaux de son infrastructure bleue et verte à l'aide de capteurs.

Le paysage de la recherche en matière de gestion de l'eau en Rhénanie-du-Nord-Westphalie

NRW bénéficie d'un paysage de recherche dynamique. Entre 2020 et 2024, les scientifiques de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie ont publié plus de 1 500 articles scientifiques dans 386 domaines de la gestion de l'eau. 121 de ces champs thématiques présentent un Future Score élevé et pourraient donc gagner en pertinence dans les années à venir. On le voit bien : la Rhénanie-du-Nord-Westphalie contribue à façonner le paysage mondial de la recherche et est active dans des champs thématiques qui revêtent une importance internationale. Si l'on se penche sur les publications de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie dans le domaine des sciences de l'eau et dans les champs thématiques présentant un Future Score élevé, on constate une concentration de la recherche dans certaines institutions clés. Il s'agit notamment de la RWTH Aachen, de l'université de Wuppertal, du centre de recherche de Jülich et de l'université de Duisbourg-Essen. En outre, il existe de nombreux exemples de collaboration et de coopération entre plusieurs universités, ce qui indique une forte culture de coopération interdisciplinaire et interinstitutionnelle, essentielle pour relever les défis complexes liés à l'eau. En ce qui concerne les institutions clés en particulier, on constate également un large éventail de thèmes liés à l'eau, de la technologie des membranes à l'électrocatalyse en passant par les solutions biosourcées, ce qui souligne la capacité de recherche large et diversifiée de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie.

Graphique 1 : localisation des principaux instituts de recherche dans le domaine de l'eau en Rhénanie-du-Nord-Westphalie



Source: © Prognos AG, 2025

2 Méthodologie : comment l'IA aide à identifier les tendances en matière de recherche et de développement dans la gestion de l'eau

L'université de Duisburg-Essen (UDE) – fleuron de la recherche en gestion de l'eau en Rhénanie-du-Nord-Westphalie - renforce le domaine de l'IA avec le supercalculateur « AmplitUDE » mis en service en décembre 2024 et classé parmi les 500 supercalculateurs les plus rapides au monde.

Les zones de tensions dans lesquels évolue la gestion de l'eau, décrits dans l'introduction, montrent qu'il reste encore beaucoup à faire. Outre les décisions politiques et le fait que tous les individus, toutes les entreprises et institutions agissent de manière responsable, il faut des innovations issues de la recherche et de l'économie qui contribuent à résoudre les divers défis et aident à préparer la gestion de l'eau pour l'avenir. Dans ce contexte, le présent Green Economy Paper met en évidence les principales contributions à l'innovation et les examine de plus près.

Afin d'obtenir un aperçu aussi complet que possible des innovations dans le domaine de la gestion de l'eau, une évaluation IA a été réalisée qui a examiné systématiquement plus de 200.000 publications scientifiques de la période 2020 – 2024. Par rapport à la recherche classique documentaire, il a ainsi été possible de collecter nettement plus d'informations sur les innovations actuelles dans le domaine de la gestion de l'eau. Avant de présenter les résultats concrets de cette évaluation de l'IA (cf. partie 3), cette partie présente plus en détail la procédure méthodologique. Elle décrit également la manière dont le cadre de référence a été établi pour les résultats de l'évaluation de l'IA. En effet, pour que les innovations ne restent pas dans le vide, elles ont été placées dans le contexte des défis de la gestion de l'eau auxquels elles répondent. On en a déduit ces défis de manière qualitative.

2.1 L'IA comme outil d'identification des innovations dans la gestion de l'eau

Une méthodologie quantitative a été utilisée pour obtenir des informations sur les développements scientifiques actuels dans le domaine de la gestion de l'eau. Concrètement, l'outil InSciT de Prognos AG a été utilisé pour ce document. Celui-ci est doté d'un accès complet aux bases de données de publications mondiales OpenAlex et Semantic Scholar ainsi qu'à la base de données de brevets PATSTAT. En analysant systématiquement les bases de données sous-jacentes, l'outil InSciT basé sur l'intelligence artificielle peut identifier les thèmes d'innovation qui ont le potentiel de marquer le domaine de la recherche et du développement dans la gestion de l'eau au cours des prochaines années. L'outil InSciT a également eu accès aux brevets déposés et à d'autres statistiques et sources d'information pour compléter les résultats. Il convient de noter, à titre de limite, que les données utilisées dans l'analyse ont été obtenues à partir de bases de données accessibles au public qui, dans certains cas, peuvent éventuellement présenter des inexactitudes. Toutefois, compte tenu de la taille du volume de données, ces écarts potentiels ne devraient pas avoir d'influence significative sur les tendances générales des résultats. Par conséquent, les résultats dans leur ensemble indiquent une évolution fiable, même si les variations et les imperfections ne peuvent pas être totalement exclues. Il convient également de noter que les tendances d'innovation identifiées dans le secteur de l'eau ont été déterminées quantitativement. L'analyse a en outre été enrichie par une sélection de publications qui ont fait l'objet d'une évaluation qualitative détaillée.

Un processus en plusieurs étapes a été mis en œuvre pour déterminer les tendances actuelles dans le domaine de la gestion de l'eau :

1. **Définition de la gestion de l'eau :** la gestion de l'eau a d'abord été définie comme base de recherche dans la banque de données par l'outil InSciT. Comme la gestion de l'eau est un marché partiel de l'économie de l'environnement, la définition de la gestion de l'eau issue du rapport sur l'économie de l'environnement de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie a été utilisée. Cette définition est la suivante : « *La gestion de l'eau comprend toutes les mesures et activités qui concernent l'utilisation durable et la protection des ressources en eau. Cela inclut l'approvisionnement en eau, l'assainissement, la protection contre les inondations et la protection des écosystèmes aquatiques. L'objectif de la gestion de l'eau est d'assurer un approvisionnement en eau suffisant et de qualité, tout en protégeant et en préservant les ressources naturelles en eau et les écosystèmes* ».[6]

2. **Application d'une procédure de classification :** sur la base de la définition, l'outil InSciT a identifié des champs thématiques ayant un lien direct ou indirect avec la gestion de l'eau. Un tel champ thématique devait présenter soit un lien évident, soit au moins un lien reconnaissable avec la gestion de l'eau. La recherche de champs thématiques a été délibérément élargie afin de couvrir également les champs de recherche qui, à première vue, n'ont rien à voir avec les questions de gestion de l'eau, mais qui, au deuxième coup d'oeil, sont pertinents. Dans le cadre de ce premier passage par la procédure de classification, une liste de plusieurs milliers de champs thématiques présentant un lien identifiable avec la gestion de l'eau pour l'IA a été établie.

3. **Hiérarchisation des champs thématiques :** Comme la procédure de classification avec l'outil InSciT a délibérément procédé à une attribution très large dans la deuxième étape afin de couvrir tous les thèmes potentiellement pertinents, une limitation des champs thématiques a été effectuée dans la troisième étape. Pour une délimitation adaptée à l'objet de l'étude de la gestion de l'eau, les champs thématiques ont été examinés quant à leur pertinence effective et classés par ordre de priorité. L'examen a été effectué par une IA au sein de l'outil InSciT ainsi que par des experts de Prognos AG. Les résultats des deux processus ont ensuite été regroupés. Ce tri thématique ciblé qui s'appuie sur la définition de la gestion de l'eau comme marché partiel de l'économie de l'environnement, a permis de garantir qu'aucun thème marginal attribué par erreur ne fausse l'évaluation quantitative des données. Ainsi, les champs thématiques liés à l'hydrogène ont par exemple été retirés de l'analyse. Bien que l'hydrogène joue un rôle important dans le contexte de la transition énergétique et qu'il soit lié à la gestion de l'eau, il n'est pas considéré comme faisant partie de la gestion de l'eau selon la définition courante et n'est donc pas au centre de cette étude.

4. **Analyse détaillée des champs thématiques :** la dernière étape a consisté à analyser en détail la liste consolidée de plus de 1 200 champs thématiques pertinents pour la gestion de l'eau. Les indicateurs suivants ont été examinés :
   - Nombre et mise à jour des publications scientifiques (publications mondiales et publications d'auteurs de Rhénanie-du-Nord-Westphalie avant 2020 et après 2020)
   - Somme et moyenne des citations de publications scientifiques (publications mondiales et publications d'auteurs de Rhénanie-du-Nord-Westphalie)
   - Appartenance à une organisation et, par conséquent, localisation géographique des publications et des citations
   - Future Score sous forme d'impact cumulé estimé des thèmes dans les prochaines années

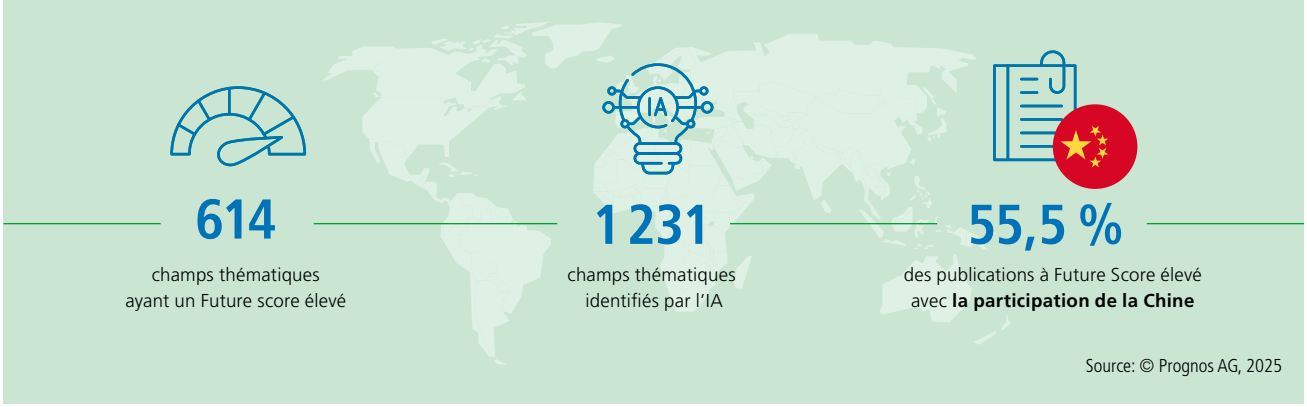
Dans le but de représenter de la manière la plus complète possible les tendances centrales de l'innovation pour la gestion de l'eau, l'analyse a été effectuée à trois niveaux à l'aide de l'outil InSciT. Premièrement, des champs thématiques scientifiques généraux et globaux ont été recensés. Cela signifie que des publications de tous les pays du monde ont été collectées et classées par thèmes. Au cours de l'analyse détaillée des champs thématiques (voir quatrième étape de la description de la méthode), les résultats globaux ont ensuite été évalués par rapport à l'activité de recherche en Rhénanie-du-Nord-Westphalie. Il a ainsi été possible de déterminer comment les instituts de Rhénanie-du-Nord-Westphalie sont intégrés

Analyse approfondie : Future Score

Afin d'identifier les tendances mondiales dans le domaine de la gestion de l'eau, les champs thématiques évalués par l'outil InSciT comme étant particulièrement pertinents pour la gestion de l'eau ont été systématiquement examinés en fonction de leur potentiel de développement. Le Future Score attribué par l'outil est un indicateur central de l'importance qu'un thème peut prendre à l'avenir. Le Future Score permet de quantifier le potentiel de développement d'un thème. Il permet de comparer et de classer la dynamique des différents champs thématiques. La dynamique décrit le changement relatif estimé pour les trois prochaines années.

Le Future Score, et donc l'estimation de la dynamique d'un thème, est obtenu de la manière suivante : sur la z base de données historiques, un modèle d'intelligence artificielle de Prognos AG a été entraîné au moyen d'une procédure d'apprentissage automatique. Le modèle apprend à prédire les relations de cause à effet et les relations entre les caractéristiques des publications sur la base de critères prédéfinis qui, pris individuellement, ont contribué au succès d'une publication scientifique. Les caractéristiques (de succès) sur lesquelles se base le modèle IA sont entre autres les citations et leur évolution, les champs thématiques, les organisations impliquées, leur localisation géographique et la répartition des auteurs. Sur la base de ces critères et de leur combinaison, le modèle IA prévoit les futurs rapports de cause à effet et les relations entre les thèmes et les publications. Le modèle évalue la pertinence future d'un thème en fonction de l'importance qu'il pourrait avoir dans les années à venir suite à ces calculs. Dans le contexte de ce document, cela signifie que pour chacun des 1 200 thèmes pertinents pour la gestion de l'eau, il existe un Future Score individuel qui classe la pertinence du thème. De plus, les champs thématiques avec un Future Score élevé ou plutôt élevé peuvent être localisés globalement. Cela permet de voir si des activités de recherche sont également menées en Rhénanie-du-Nord-Westphalie dans le champ thématique en question.

Graphique 2 : chiffres et données d'ordre général issus de l'analyse IA à l'échelle mondiale



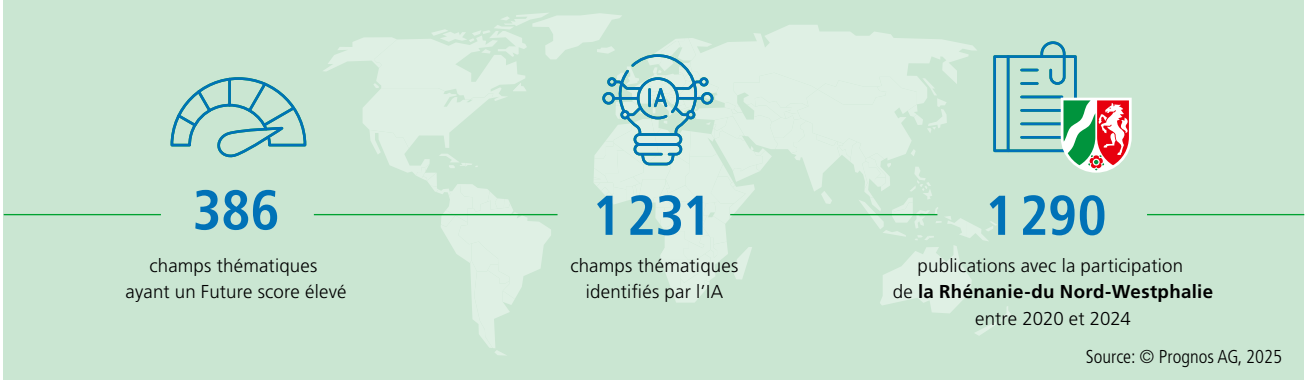
thématiquement dans la recherche mondiale sur les thèmes de la gestion de l'eau et dans quels champs thématiques avec un Future Score élevé la Rhénanie-du-Nord-Westphalie occupe une part importante dans la recherche mondiale. Enfin, les champs thématiques ont été examinés en troisième lieu, quant à leur rapport avec les défis définis auparavant. Tous les champs thématiques ont été attribués, dans la mesure du possible, à un défi approprié. La section suivante traite des défis qui en découlent. Les graphiques 2 et 3 donnent un premier aperçu des résultats de l'évaluation. Ils montrent en chiffres combien de champs thématiques dans la gestion de l'eau ont pu être identifiés pour la Rhénanie-du-Nord-Westphalie et le monde grâce à l'analyse IA. Ils donnent également un aperçu du nombre de publications parues sur ces champs thématiques entre 2020 et 2024 et du nombre de champs thématiques possédant un Future Score élevé. Si l'on considère les chiffres globaux, il est frappant de constater que sur les 1.231 champs thématiques identifiés à l'aide de l'IA, 614 présentent un Future Score élevé. Parmi toutes les publications dans ce domaine, plus de 55 % proviennent de Chine, ce qui indique une position de recherche extrêmement dominante de la République populaire.

La Rhénanie-du-Nord-Westphalie est également très présente dans la recherche sur les thèmes de la gestion de l'eau. Près d'un quart (386 sur 1.231) des champs thématiques font l'objet de recherches en Rhénanie-du-Nord-Westphalie qui se sont traduites par 1.290 publications scientifiques entre 2020 et 2024 – un chiffre élevé, surtout pour un seul Land.

2.2 Détermination des défis pour la gestion de l'eau

La gestion de l'eau en Rhénanie-du-Nord-Westphalie est confrontée à des défis actuels et futurs. Ceux-ci sont présentés en détail au chapitre 3. Il s'agit ici d'identifier ces défis. Pour ce faire, des stratégies politiques pertinentes en rapport avec l'eau ont d'abord été recherchées au niveau international, national et de la Rhénanie-du-

Graphique 3 : chiffres et données d'ordre général issus de l'analyse IA à l'échelle de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie



Nord-Westphalie et ont été analysées en fonction des problématiques qui y sont décrites. Au niveau mondial, il s'agit des Objectifs de développement durable (ODD) des Nations Unies. L'ODD 6 – *Eau propre et assainissement*, en particulier, définit le cadre d'un meilleur approvisionnement en eau pour tous. Les technologies d'utilisation de l'eau potable (ODD 6.1), le traitement de l'eau (ODD 6.3) et l'utilisation efficace de l'eau (ODD 6.4) sont des éléments clés pour atteindre cet objectif de durabilité. Afin d'accélérer les progrès vers la réalisation de l'ODD 6, la Stratégie de l'ONU pour l'eau 2030 a été adoptée en 2020. Parallèlement, celle-ci vise également à promouvoir la coopération entre les États membres des Nations unies sur les problèmes mondiaux liés à l'eau. Au niveau de l'UE, la directive-cadre sur l'eau (2000) est un instrument politique important qui vise à amener tous les cours d'eau, les lacs, les eaux souterraines et les eaux côtières à un « bon état » d'ici 2027. Au niveau national en Allemagne, la stratégie nationale de l'eau du gouvernement fédéral de 2023 donne un cadre d'action pour une gestion moderne de l'eau.

Elle prend en compte les défis de la gestion de l'eau jusqu'en 2050 et s'articule autour de dix thèmes stratégiques qui indiquent la direction à suivre pour les 30 prochaines années et décrivent des objectifs et des mesures concrets. Au niveau de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie, le document de référence sur la stratégie d'avenir de l'eau de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie, publié en 2024, esquisse 17 points clés pour une gestion de l'eau sûre et résiliente.

Les critères suivants ont servi de base pour déterminer les défis :

1. Le défi est directement lié à la gestion de l'eau.
2. Le défi est d'importance tant pour la Rhénanie-du-Nord-Westphalie qu'à l'échelle mondiale.
3. Le défi n'est pas purement politique, il englobe un thème de recherche et peut être résolu (au moins en partie) par l'innovation.*
4. Ce défi est abordé dans plusieurs stratégies pertinentes.

Il en a résulté les cinq défis thématiques présentés dans le chapitre suivant et associés aux innovations ou tendances thématiques issues de l'analyse de l'IA.

* Le présent Green Economy Paper se concentre sur le rôle de l'innovation dans la gestion de l'eau et sur son potentiel à résoudre les principaux défis de la gestion de l'eau. Dans ce contexte, les défis politiques et structurels ne seront pas abordés plus en détail.

3 Défis de la gestion de l'eau et solutions issues de la recherche

La télédétection joue un rôle croissant dans la gestion de l'eau, que ce soit en cas d'inondations, pour le contrôle de la qualité de l'eau ou pour l'utilisation de l'IA. L'image satellite montre les systèmes de gestion de l'eau d'Amsterdam et de Flevoland aux Pays-Bas, un partenaire important de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie en matière de gestion de l'eau pour les bassins hydrographiques de la Ruhr, de la Meuse et du Rhin.

L'évaluation qualitative des stratégies centrales dans le domaine de la gestion de l'eau (cf. chapitre 2) a permis de mettre en évidence cinq défis majeurs à relever au cours des prochaines années.

- Il s'agit *en premier lieu* de la pénurie d'eau qui se manifeste de plus en plus dans un nombre croissant de régions du monde et qui est aujourd'hui extrêmement importante dans les régions menacées par la sécheresse, mais qui pourrait également se faire sentir dans un avenir proche dans des régions autrefois « à l'abri de la sécheresse » comme la Rhénanie-du-Nord-Westphalie.

- *Deuxièmement*, l'état des écosystèmes aquatiques se dégrade dans le monde entier, et les eaux de Rhénanie-du-Nord-Westphalie aussi sont encore loin d'atteindre un « bon niveau ».

- *Troisièmement*, un cocktail problématique de substances diverses et parfois nocives continue d'être détecté dans notre eau. L'un des principaux défis consiste à empêcher l'introduction de substances chimiques dans les eaux et à filtrer les substances nocives.

- *Quatrièmement*, le changement climatique entraîne une augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes tels que les fortes pluies et les inondations. L'infrastructure hydraulique doit s'y préparer dans les années à venir.

- Enfin, *cinquièmement*, il faut une utilisation des sols compatible avec l'eau et résiliente au climat, en ville comme à la campagne, afin de pouvoir assurer à l'avenir aussi bien l'irrigation des terres arables que l'approvisionnement en eau potable des populations dans un monde de plus en plus urbanisé.

Le graphique 4 donne un aperçu des différents défis de la gestion de l'eau qui sont développés plus loin. En outre, à la suite de chaque défi, les solutions et les innovations qui ont pu être identifiées grâce à l'analyse de l'IA sont présentées. Pour cela, certains champs de recherche sont décrits dans le contexte international et pour la Rhénanie-du-Nord-Westphalie qui apportent une contribution essentielle à la résolution des défis de la gestion de l'eau. Pour une classification plus approfondie, les résultats ont été enrichis d'informations supplémentaires grâce à une recherche documentaire. En outre, la participation du paysage de la recherche en Rhénanie-du-Nord-Westphalie

Graphique 4 : Les principaux défis de la gestion de l'eau

Pénurie d'eau et protection des ressources mondiales

Caractéristiques principales : population mondiale en augmentation, pénurie d'eau croissante et crise climatique

Protection desécosystèmes aquatiques

Caractéristiques principales : les écosystèmes et la biodiversité sont menacés par l'urbanisation, l'industrie et le changement climatique

Risques liés aux entrées de matières et autres substances polluantes

Caractéristiques principales : diverses substances polluantes présentent des risques pour la santé et l'environnement.

Adaptation des infrastructures hydrauliques au climat

Caractéristiques principales : les phénomènes météorologiques extrêmes menacent les infrastructures hydrauliques

Utilisation des sols compatible avec les eaux et résiliente au climat

Caractéristiques principales : le changement climatique et l'agriculture intensive nuisent à la qualité de l'eau, l'urbanisation renforce la pénurie d'eau.

Source: © Prognos AG, 2025

est également mise en évidence et les champs de recherche sont décrits dans lesquels les institutions de Rhénanie-du-Nord-Westphalie sont largement impliquées au niveau de champs de recherche importants.

- Sont considérés comme domaines de recherche à forte participation de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie tous ceux pour lesquels la part des publications d'institutions de recherche de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie sur l'ensemble des publications (mondiales) depuis 2020 est supérieure à 5 %.
- Les domaines de recherche dans lesquels la Rhénanie-du-Nord-Westphalie n'est pas active, mais pour lesquels une pertinence future élevée est pronostiquée, sont identifiés de la manière suivante : parmi tous les champs thématiques attribués à un défi, ceux qui présentent le plus grand nombre de publications et un Future Score élevé sont sélectionnés. Par conséquent, il n'y a pas de valeur limite concrète dans ce cas et le nombre de publications des champs thématiques globalement pertinents diffère selon le défi.

3.1 Pénurie d'eau et protection des ressources mondiales

Le défi – de quoi s'agit-il ?

Selon les estimations, la Terre comptera 9,7 milliards d'habitants d'ici 2050. Ce chiffre pourrait même atteindre 10,2 milliards d'ici 2100.[7] Parallèlement, le mode de vie d'un grand nombre de personnes évolue, ce qui entraîne une utilisation accrue des ressources en eau. Aujourd'hui déjà, près de 2 milliards de personnes vivent dans des régions où la pénurie d'eau est importante.[8] Et même si l'approvisionnement en eau et l'évacuation des eaux se sont considérablement améliorés dans de nombreuses régions du monde au cours des dernières décennies, au moins 3 milliards de personnes, principalement dans le Sud, n'ont toujours pas un accès approprié à une eau de qualité suffisante. Et même près de la moitié de la population mondiale ne bénéficie pas de service sanitaire adéquat.[9] La crise climatique croissante ne fera qu'aggraver ces tendances à l'avenir et réduira les ressources en eau également à d'autres endroits. En outre, le réchauffement de la planète modifie les modèles de précipitations et d'évaporation à l'échelle mondiale et régionale. Il en résulte une augmentation de la teneur en eau de l'atmosphère, ce qui entraîne des événements extrêmes plus fréquents tels que des inondations et des sécheresses.[10] De plus, les ressources en eau douce proches de la mer sont de plus en plus menacées par la salinisation, ce qui aggrave encore la pénurie d'eau.[11]

Au niveau national, il apparaît que même si l'approvisionnement de base est largement assuré en Allemagne, la gestion de l'eau est soumise à une pression croissante dans ce pays. La gestion de l'eau couvre deux domaines d'approvisionnement essentiels qui font partie des infrastructures critiques (PIC) – un approvisionnement fiable en eau et l'évacuation des eaux usées. Ces deux domaines sont de plus en plus confrontés à des défis qui pourraient à l'avenir menacer la sécurité de l'approvisionnement en eau potable. La baisse du niveau des nappes phréatiques, l'incertitude quant à la disponibilité de l'eau et l'augmentation de la demande en eau pendant les périodes de canicule peuvent menacer à long terme l'approvisionnement en eau dans certaines parties de la République fédérale. Des solutions doivent donc être développées pour garantir durablement l'approvisionnement en eau potable même dans des pays fondamentalement riches en eau comme l'Allemagne. Car ici aussi, les effets du changement climatique jouent un rôle décisif. Ainsi, la quantité de précipitations augmente certes en moyenne annuelle, mais les précipitations se concentrent sur quelques mois seulement. Alors qu'il faut s'attendre à des précipitations parfois trop élevées pendant les mois les plus froids, il ne pleut pas assez pendant les mois d'été. De plus, l'assèchement des marais, l'imperméabilisation des sols et le déboisement des forêts réduisent la capacité des sols à stocker l'eau, ce qui accélère la pénurie d'eau pendant les périodes de sécheresse. Au total, l'Allemagne a perdu en moyenne 2,5 km³ d'eau par an depuis l'an 2000 en raison de l'intensification des phases de sécheresse et de la réduction des capacités de stockage.[12]

Les conditions géologiques, hydrochimiques et hydrologiques régionales entraînent des différences dans la disponibilité des eaux souterraines. Ainsi, en Allemagne, il existe aussi bien des régions qui disposent de suffisamment d'eau souterraine, voire de trop, que des régions, notamment urbaines, dont les réserves d'eau souterraine diminuent. Cela s'explique d'une part par une densité de population plus élevée et donc une consommation plus importante, et d'autre part par le manque de possibilités au plus près de la nature dans les villes pour recueillir et stocker l'eau de pluie. Pour toutes les régions, il est également vrai que dans l'agriculture et l'industrie, les besoins en eau augmenteront à l'avenir en raison de la fréquence croissante des jours de canicule et d'une forte consommation. Si les régions concernées ne changent pas de cap et ne gèrent pas les ressources en eau de manière durable, elles risquent de se retrouver en situation de pénurie.

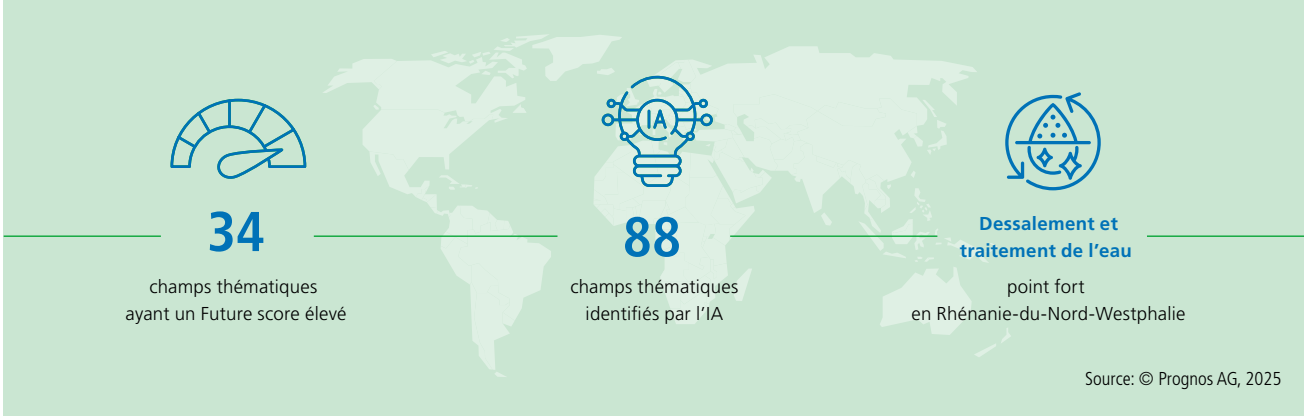
Entre les deux îles de palmiers se trouve la plus grande usine de dessalement d'eau de mer au monde, Jebel Ali. Elle fonctionne à l'énergie fossile.

Des solutions possibles : économiser l'eau et protéger les ressources mondiales !

Dans l'ensemble, il convient de noter que relativement peu de champs de recherche ont pu être associés au défi considéré dans le cadre de l'analyse de l'IA. En particulier pour la protection des ressources mondiales, les conditions politiques générales et les mesures visant à réduire le réchauffement climatique jouent un rôle primordial. Néanmoins, 88 thèmes de recherche en rapport avec le défi « pénurie d'eau et protection des ressources mondiales » se retrouvent dans les données considérées. Parmi ces thèmes, 34 ont un Future Score élevé ou plutôt élevé. La Rhénanie-du-Nord-Westphalie n'a pas de priorité de recherche générale dans ce domaine. La Rhénanie-du-Nord-Westphalie se distingue toutefois dans un domaine thématique, à savoir le dessalement et le traitement de l'eau à base de solvants. Dans ce domaine, les instituts de recherche de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie sont à l'origine d'une grande partie des publications mondiales. C'est une bonne nouvelle, car on attribue à ce domaine de recherche un Future Score plutôt élevé, ce qui signifie que l'on peut s'attendre à une augmentation des publications dans les années à venir. Il y a donc une chance que les applications pratiques s'améliorent encore grâce à des procédés innovants.[13]

Dessalement et traitement de l'eau à base de solvants : ce procédé utilise des solvants organiques pour produire de l'eau propre à partir de sources salines. Cette approche présente des avantages par rapport aux techniques de dessalement traditionnelles, car elle nécessite moins d'énergie et le processus est plus efficace et plus respectueux de l'environnement.[14] Cette méthode pourrait jouer un rôle important, en particulier pour les régions économiquement fortes qui connaissent une pénurie d'eau, comme la Californie et les pays du Golfe. Les instituts de recherche de Rhénanie-du-Nord-Westphalie ont donc la possibilité de s'engager davantage dans ce domaine et de contribuer ainsi à l'avenir à de nouveaux progrès dans ce procédé.

Graphique 5 : chiffres relatifs à la recherche dans le domaine du défi « pénurie d'eau et ressources mondiales »



Source: © Prognos AG, 2025

En principe, les procédés de dessalement peuvent être utilisés dans différents domaines, par exemple pour le traitement des déchets industriels aqueux, des eaux usées communales et dans le dessalement de l'eau saumâtre et de l'eau de mer. Les procédés de dessalement ont en commun le fait qu'ils recyclent l'eau et réduisent ainsi la consommation d'eau douce. Les usines de dessalement d'eau de mer peuvent contribuer à fournir de l'eau potable aux agglomérations urbaines. Il convient toutefois de mentionner que le processus de dessalement traditionnel est controversé en raison de la consommation d'énergie élevée et de la pollution de l'environnement par la saumure toxique qui reste.[15] L'évaluation de l'analyse de l'outil InSciT montre toutefois qu'une forte activité a été constatée ces dernières années dans les domaines thématiques liés à la gestion de l'eau.

Les tendances internationales de la recherche qui contribuent à résoudre la pénurie mondiale d'eau se concentrent entre autres dans le domaine du traitement de l'eau. L'Europe du Sud se distingue d'une part avec des pôles de recherche en Grèce et en Espagne. D'autre part, les instituts de recherche chinois affichent également une forte proportion de publications innovantes. Le traitement de l'eau sert à recycler autant que possible l'eau utilisée dans les processus ou à l'utiliser à d'autres fins et à réduire ainsi la consommation d'eau. Les méthodes de dessalement mentionnées plus haut en font également partie. Les tendances de la recherche dans ce défi sont fortement liées à celles du défi « Entrées de matières dans l'eau et autres substances polluantes » car la pollution de l'eau a également un impact sur la pénurie d'eau et la protection des ressources mondiales.

Electrodialyse pour le traitement de l'eau et la récupération des ressources : l'électrodialyse joue un rôle central dans les processus de traitement des eaux usées et de dessalement. Il s'agit d'un procédé qui utilise des membranes spéciales qui éliminent de manière ciblée les ions de la solution saline. Elle peut être utilisée d'une part pour le dessalement de l'eau de mer, mais aussi pour l'épuration des eaux usées et l'élimination des sels et autres polluants. Les avantages de l'électrodialyse par rapport à d'autres procédés sont notamment des taux de récupération d'eau plus élevés, une utilisation simple et une longue durée de vie des membranes. L'un des principaux défis réside dans les besoins énergétiques élevés du procédé. Les progrès technologiques ont déjà permis d'améliorer l'efficacité énergétique des procédés d'électrodialyse pour le traitement de l'eau, mais des recherches sont encore nécessaires pour que le procédéait également le potentiel d'être utilisé à grande échelle à l'avenir.[16] L'intégration de l'électrodialyse dans les différentes applications de gestion de l'eau favorise une gestion durable des ressources et contribue ainsi à protéger les ressources et à lutter contre la pénurie d'eau.[17]

Évaporation de l'interface solaire et dessalement : une autre méthode de dessalement de l'eau de mer est une évolution de l'évaporation classique : en plaçant des matériaux à la surface de l'eau, la chaleur solaire se concentre sur l'interface et l'eau de mer se transforme plus rapidement en vapeur qui peut ensuite être condensée en eau douce. Cette technologie qui est encore en développement actuellement peut contribuer à lutter contre la pénurie mondiale d'eau douce. Les recherches se concentrent notamment sur l'amélioration des taux d'évaporation où les conceptions et les matériaux innovants jouent un rôle crucial. Par exemple, l'ajout de certains minéraux[18] ou l'utilisation du débit de l'eau[19] peut augmenter le taux d'évaporation de l'eau de mer.

Valorisation et traitement des eaux usées des moulins à huile d'olive : chaque année, plus de 3 millions de tonnes d'huile d'olive sont produites dans le bassin méditerranéen. Les moulins à huile d'olive produisent de grandes quantités d'eaux usées, ce qui entraîne une pollution de l'environnement et une forte consommation des réserves d'eau douce déjà limitées dans les pays producteurs.[20] L'exportation de l'huile d'olive dans le monde entier en fait en outre un sujet d'importance mondiale. Pour protéger les rares réserves d'eau douce, il serait très important de pouvoir recourir à des procédés innovants et économiquement viables pour traiter l'eau des moulins à huile d'olive. Différentes stratégies innovantes sont à l'étude pour la mise en œuvre, elles ne sont pas encore rentables à l'heure actuelle, mais présentent un potentiel pour l'avenir. Ce domaine de recherche se caractérise certes par un Future Score élevé, mais il est peu dynamique et compte relativement peu de publications en comparaison avec les deux thèmes mentionnés plus haut. Il est toutefois clair que des changements à petite échelle peuvent contribuer à une gestion durable des ressources en eau.

Évaluation des résultats

Il en résulte qu'il existe déjà aujourd'hui un certain nombre de contributions de recherche essentielles pour lutter contre la pénurie d'eau et protéger les ressources mondiales. Celles-ci se concentrent notamment sur les procédés de traitement de l'eau. Certes, les contributions de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie à la recherche ne représentent qu'une faible part nominale. En termes de pertinence technique, la Rhénanie-du-Nord-Westphalie se distingue toutefois dans les domaines du dessalement de l'eau et du traitement de l'eau à base de solvants.

3.2 Risques liés aux entrées de matières et autres substances polluantes

Le défi – de quoi s'agit-il ?

Dans les films, les publicités ou les annonces de voyage, la représentation de l'eau se caractérise principalement par deux propriétés. Elle est claire et pure. Les gens peuvent la boire ou s'y baigner, barboter et nager sans crainte. Malheureusement, dans la réalité, cet idéal ne peut souvent pas être respecté. En effet, les eaux de surface sous toutes leurs formes – ruisseau de source, étang, rivière, lac ou mer – sont exposées à une pollution massive due aux microplastiques, produits chimiques, médicaments, engrais et pesticides. Selon des chiffres récents de la Fondation Heinrich Böll, plus de la moitié des rivières allemandes présentent une pollution excessive par le phosphore, plus de 150 médicaments (comme les antibiotiques) peuvent être détectés dans les eaux allemandes et plus de 1.500 sites en Allemagne sont des points névralgiques de la pollution de l'eau causée par des produits chimiques industriels. Tout cela met en danger les écosystèmes, la faune et la flore, sans oublier la santé humaine.[21]

Au niveau mondial également, de nombreuses personnes souffrent de la pollution de l'eau. Par exemple, Anja du Plessis, chercheuse à l'Université d'Afrique du Sud, constate dans un article de 2022 que la qualité globale de l'eau se dégrade depuis les années 1990 et qu'un état d'urgence mondial de l'eau pourrait survenir si la pollution n'est pas combattue.[22] En 2025, le constat est le même : cet état d'urgence de l'eau est déjà une réalité pour de nombreuses personnes et a des conséquences brutales. Au Niger, par exemple, 73,6 % des personnes vivent sans accès garanti à des sources d'eau suffisamment propres. Au Tchad, ce chiffre est de 81,6 % et en Éthiopie de 82,2 %. Pour de nombreuses personnes, ce manque ou ce mauvais accès à l'eau potable et aux services sanitaires a des conséquences sanitaires qui peuvent aller de la maladie à la mort.[23]

Mais quels sont exactement les principaux défis à relever lorsqu'il s'agit de la pollution de l'eau ? En d'autres termes, quels sont les dangers qui doivent être combattus pour que les gens disposent de suffisamment d'eau propre ? Les aspects principaux sont décrits ci-dessous pour la Rhénanie-du-Nord-Westphalie, l'Allemagne et le contexte mondial. Il est important de noter que ce défi ne concerne que le traitement de l'eau, et non sa mise à disposition en quantité suffisante.

En Rhénanie-du-Nord-Westphalie, la qualité de l'eau s'est considérablement améliorée par rapport au 20e siècle, mais moins de 10 % des cours d'eau sont qualifiés de « bons » en termes de qualité de l'eau.[24] Trop de polluants ont trouvé leur chemin dans les eaux par le passé et se retrouvent encore aujourd'hui dans les eaux souterraines. Certains (micro)polluants clés méritent une attention accrue à l'avenir dans le cadre de la protection des eaux :

1. **Les engrais synthétiques ainsi que les pesticides et les produits phytosanitaires** utilisés par exemple dans l'agriculture sont une cause majeure de la croissance des algues, du manque d'oxygène et de la mort des poissons dans les eaux, car les plantes ne peuvent absorber qu'une partie des nutriments. Le reste entraîne une forte pollution per l'azote, les nitrates et le phosphore dans les eaux de surface et souterraines. Les pesticides et les produits phytosanitaires peuvent également entraîner des dommages environnementaux.

2. **Les substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS),** également appelés produits chimiques éternels, sont des composés extrêmement persistants qui peuvent causer des dommages au corps humain. Ils augmentent le risque de diabète et de cancer et sont également absorbés par l'homme via l'eau potable.[25] Ils y pénètrent par le biais de l'élimination de produits chimiques industriels, de boues d'épuration contaminées par des PFAS et utilisées comme engrais, ou encore en tant que composants de déchets plastiques à usage unique mal éliminés.

3. **Des résidus de médicaments** sont continuellement détectés dans les eaux de surface du monde entier (par exemple dans les écoulements de stations d'épuration, les rivières ou les lacs). En raison de l'augmentation de la consommation de médicaments dans le monde qui s'explique par le vieillissement de la population et l'utilisation de médicaments dans l'élevage intensif ( ), cette pollution pourrait même augmenter dans les années à venir.[26] Les médicaments les plus fréquemment détectés sont les antiépileptiques, les analgésiques (antidouleurs), les antibiotiques, les antihypertenseurs et les produits de contraste radiographiques. Même s'il n'y a pas de risque pour la santé jusqu'à présent, l'augmentation de l'entrée de substances pourrait à l'avenir présenter des dangers qu'il convient de prévenir.[27]

4. **Les germes résistants aux antibiotiques** arrivent par exemple dans les stations d'épuration via le lisier issu de l'élevage intensif et les eaux usées cliniques ou domestiques, puis directement dans l'environnement sous forme d'eaux usées épurées. De là, ils peuvent retrouver leur chemin vers l'homme (par exemple dans les eaux de baignade). Selon l'Office fédéral de l'environnement, l'ampleur des agents pathogènes multirésistants prend des « proportions menaçantes » en

Allemagne[28] et peut conduire à des infections qui ne peuvent plus être traitées avec des antibiotiques traditionnels. De telles infections ont causé la mort d'environ 33 000 personnes en Europe en 2018.[29] Le défi pour la gestion de l'eau est d'empêcher les germes résistants aux antibiotiques de pénétrer dans l'environnement.

5. **Les produits de consommation industriels** et les produits chimiques peuvent également s'infiltrer dans les eaux ou le cycle de l'eau par le biais des eaux usées. C'est le cas, par exemple, de matériaux tels que les imprégnations textiles, les lubrifiants, les réfrigérants et les fluides frigorigènes ou les matériaux contenant des PFAS. Pour limiter ces entrées de substances et les dommages environnementaux qui en résultent, il faut non seulement améliorer la gestion des produits chimiques au niveau de l'entreprise, mais aussi les procédés de traitement des eaux usées qui permettent de filtrer ces substances.[30] L'urgence est évidente si l'on considère l'ampleur globale de la situation, 300 à 400 mégatonnes d'eaux usées polluées sont rejetées chaque année dans l'environnement. Cela entraîne une pollution extrême de l'environnement et des dommages pour la santé. En Indonésie, on peut même attribuer jusqu'à 50.000 décès à la pollution du fleuve Citarum, le long duquel se trouvent environ 2.000 usines qui rejettent leurs eaux usées.[31]

Solutions : filtrer les entrées de matières et autres substances polluantes !

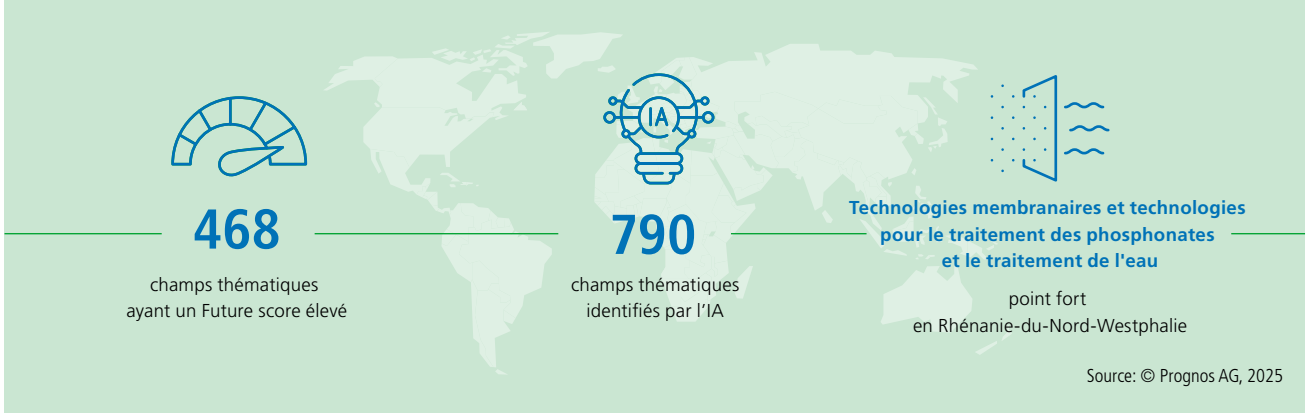
« Les entrées de matières et la contamination de l'eau » se sont révélées être un champ de recherche central dans l'analyse. Au total, 790 champs de recherche différents ont pu être identifiés dans l'analyse pour ce domaine. Parmi ces 790 champs de recherche, 468 présentent un Future Score élevé ou plutôt élevé. Des instituts de recherche de

Pionniers techniques de Rhénanie-du-Nord-Westphalie : grâce à la technologie de traitement PerfluorAd®, Fraunhofer UMSICHT et Cornelsen Umwelttechnologie GmbH ont mis au point un procédé commercialisable qui élimine les PFAS des milieux aqueux de manière économique et efficace.

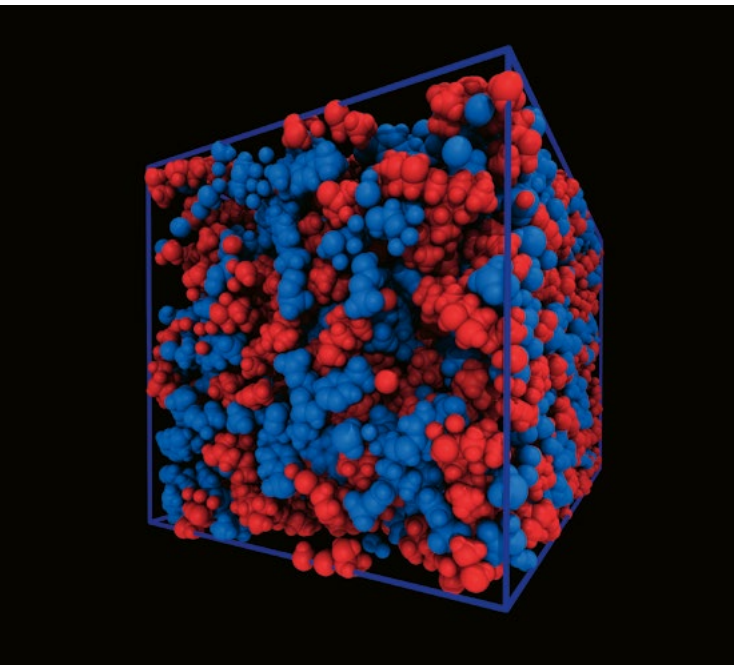
Rhénanie-du-Nord-Westphalie participent également à cette recherche dans une mesure significative. Dans 14 des 468 champs de recherche sur le défi « Entrées de matières et autres contaminations de l'eau » avec un Future Score élevé, les chercheurs de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie participent à 5–23 % des publications mondiales depuis 2020. Des exemples de publications dans les différents domaines de recherche se trouvent dans les notes finales. Cinq thèmes se distinguent par l'intensité des recherches menées en Rhénanie-du-Nord-Westphalie :

Techniques d'élimination et de traitement des phosphonates : les phosphonates sont des composés chimiques difficilement dégradables qui se retrouvent dans les eaux via les eaux usées – souvent comme faisant partie des produits de lavage et de nettoyage.[32] Leur élimination, leur traitement et leur récupération sont des thèmes de

Graphique 6 : chiffres relatifs à la recherche dans le domaine du défi « risques liés aux entrées de matières et autres substances polluantes »



Source: © Prognos AG, 2025



Le département Génie des procédés (AVT) de l'université RWTH d'Aix-la-Chapelle mène des recherches sur des membranes innovantes. Ici, simulation de dynamique moléculaire (MD) d'une membrane polyélectrolyte.

recherche importants. Pourtant jusqu'à présent il n'existe encore aucune technologie rentable pour récupérer les phosphonates dans les eaux usées. C'est là que la recherche actuelle intervient. Elle étudie les substances et les techniques qui lient et éliminent le mieux et le plus efficacement les phosphonates de l'eau. A cet égard, l'utilisation d'hydroxyde de fer granulaire ou de minéraux argileux ainsi que d'autres composés chimiques semblent prometteurs.[33]

Analyse et quantification des microplastiques : comme nous l'avons déjà décrit, les microplastiques font partie des substances qui, à long terme, nuisent à l'environnement et aux animaux. Des recherches sont menées à cet effet a) sur des procédés permettant de procéder à une caractérisation physique des microplastiques (par exemple par la lumière dynamique ou diffraction du laser), b) sur des approches permettant de classer les microplastiques de manière plus précise sur le plan chimique afin de les séparer et c) sur des procédés d'analyse permettant d'analyser quantitativement les microplastiques afin de mieux comprendre la pollution à grande échelle de l'environnement et des eaux et de mesurer les concentrations locales. Les champs de recherche sont en soi très différents et ne peuvent pas être présentés ici de manière approfondie.[34]

Membranes à motifs pour séparer et contrôler la pollution : comme l'a montré l'analyse des tendances mondiales, les technologies membranaires font partie des développements les plus importants lorsqu'il s'agit de filtrer les polluants de l'eau. Mais les membranes elles-mêmes s'encrassent au fil du temps. Cela entraîne des coûts (de remplacement ou de nettoyage) qui font obstacle à une utilisation encore plus large de la technologie. Les membranes à motifs doivent résoudre ce problème. En effet, les topographies à la surface de la membrane ont pour effet d'améliorer les propriétés hydrodynamiques de la membrane (grâce au mouvement et à la stimulation) de telle sorte que moins d'impuretés se forment à sa surface.[35] De plus, les motifs de la membrane réduisent la surface de contact avec les particules d'encrassement, ce qui permet à moins de particules de se déposer sur les membranes.[36]

Membranes multicouches de polyélectrolytes pour le traitement de l'eau : les membranes multicouches de polyélectrolytes constituent un autre sous-cluster dans le domaine des membranes, pour lequel la Rhénanie-du-Nord-Westphalie est fortement impliquée dans la recherche internationale. Il s'agit de membranes qui, grâce à leur revêtement spécifique, sont en mesure de filtrer les particules, les microbes et les substances dissoutes dans l'eau, même les plus petites. Les membranes multicouches de polyélectrolytes peuvent ainsi filtrer efficacement les traces de médicaments ou de pesticides dans les eaux usées et contribuent ainsi au traitement des eaux usées et à l'approvisionnement en eau potable.[37]

Dégradation des antibiotiques grâce à la désinfection au chlore : le chlore est utilisé depuis longtemps comme désinfectant dans la gestion de l'eau. En Allemagne il est surtout connu pour son utilisation dans les piscines. En raison de ses propriétés chimiques, le chlore est bien adapté à la prévention de la contamination de l'eau par des bactéries et des agents pathogènes (virus). Dans le contexte de la dégradation des antibiotiques, le chlore est souvent combiné à diverses autres substances (exemple l'ozone) ou techniques (la lumière UV) afin d'éliminer les résidus d'antibiotiques dans l'eau.[38] Toutefois, des recherches et des développements supplémentaires sont nécessaires pour parvenir à des innovations réellement pertinentes et, le cas échéant, à une technique utilisable dans le domaine de la gestion de l'eau qui permettrait réellement d'éliminer les antibiotiques dans l'eau.

Outre ces thèmes d'importance mondiale ancrés dans le paysage de recherche de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie, il existe en Chine, aux États-Unis et au Canada des pôles de recherche internationaux dans lesquels la Rhénanie-du-Nord-Westphalie est moins fortement représentée. Les innovations issues de ces pôles de recherche internationaux contribuent également à relever le défi « entrées des matières et autres substances polluantes dans l'eau ». Les trois premiers thèmes de recherche internationaux sont présentés ci-dessous. Ils ont été établis sur la base de l'examen du plus grand nombre de publications dans le monde et du nombre d'articles publiés sur ce thème depuis 2020.

Structures organiques covalentes (covalent organic frameworks) sont une classe de polymères. Grâce à leur structure poreuse caractérisée par une multitude de cavités et de trous microscopiques, ils permettent de stocker et de filtrer ou de séparer des gaz et des liquides tels que l'hydrogène ou le méthane. Pour la gestion de l'eau, le potentiel des structures organiques covalentes n'a été découvert qu'au cours de ces dernières années et les chercheurs s'y intéressent davantage depuis. L'espoir est fondé sur la structure qui s'adapte à leur tâche et qui pourrait par exemple être utilisée pour la nanofiltration dans des membranes mixtes afin de dessaler l'eau, d'éliminer les impuretés organiques (par exemple les colorants) ou d'absorber les ions métalliques (métaux lourds).[39] Avec plus de 1 600 articles publiés sur les structures organiques covalentes, dont 69 % après 2020, il s'agit ici d'un domaine de recherche dynamique et en plein essor.

Membranes superhydrophobes pour la séparation de l'huile et de l'eau : dans ce domaine de recherche, l'accent est mis sur des matériaux qui, d'une part, repoussent le plus possible l'eau (superhydrophobes) et, d'autre part, attirent l'huile (oléophiles). Si de tels matériaux sont utilisés ensemble dans des membranes, ils peuvent permettre une séparation efficace de l'huile et de l'eau. Des membranes de ce type sont déjà utilisées et ont fait leurs preuves : lors de la séparation sélective de mélanges huile-eau, elles ont pu atteindre un taux de séparation de l'huile de plus de 99 %. Cependant, des recherches sont encore nécessaires, par exemple sur les effets de l'huile brute (et de ses composants) sur l'efficacité de séparation de la membrane, ainsi que sur le comportement de la membrane elle-même en cas de contact avec l'huile.[40]

Traitement de l'eau par oxydation / oxydation avancée : il s'agit ici d'un groupe de procédés pour un traitement efficace et durable de l'eau. Ce domaine de recherche regroupe différents procédés de traitement chimique de l'eau qui utilisent respectivement des radicaux hydroxyles, de l'ozone ou du peroxyde d'hydrogène (ou une combinaison des deux). Les radicaux hydroxyles sont des composés d'atomes d'hydrogène et d'oxygène qui réagissent avec des substances difficilement dégradables chimiquement et biologiquement. L'oxydation est utilisée pour purifier les eaux industrielles, les eaux de processus et de production contenant des substances qui ne sont pas dégradées dans une étape d'épuration purement biologique (p ex. les pesticides, biocides et médicaments).[41] Le traitement de l'eau par oxydation constitue donc un groupe de méthodes très prometteur pour le traitement de l'eau. Toutefois, on ne sait pas encore clairement quelle méthode pourrait s'imposer en cas d'application à grande échelle dans la gestion de l'eau.[42]

Évaluation des résultats

Le classement du défi « Risques liés aux entrées de matières et autres substances polluantes » a permis de mettre en évidence le grand nombre de substances individuelles qui pénètrent par différentes voies dans les eaux du monde, d'Allemagne et de Rhénanie-du-Nord-Westphalie. En outre, il s'est avéré que des solutions innovantes sont nécessaires pour que la qualité de l'eau puisse être soit maintenue soit améliorée. L'évaluation des tendances de la recherche montre que, que ce soit par le biais de technologies membranaires innovantes, de l'utilisation de substances chimiques, de la lumière ou d'autres procédés, l'entrée de substances dans l'eau et le filtrage de ces substances constituent un élément central de la recherche. Cette affirmation s'applique à la plupart des substances décrites au début qui entrent dans nos eaux souterraines, qu'il s'agisse d'engrais, de microplastiques, de résidus de médicaments ou de produits chimiques. Cela laisse espérer des progrès. De plus on a constaté que le paysage de la recherche en Rhénanie-du-Nord-Westphalie dans le domaine de la technologie des membranes apporte une contribution importante à la recherche internationale et constitue ainsi un point fort dans le développement d'une future technologie clé.

Filtrer les matières premières critiques présentes dans l'eau

Outre une plus grande disponibilité d'eau propre, le filtrage des eaux polluées par les technologies membranaires présente un autre avantage : des matières premières critiques peuvent être recyclées à partir de ces eaux. Ces matières sont d'une grande importance économique, notamment pour les énergies renouvelables. Cependant, la concentration des sources d'approvisionnement et le manque d'options de recyclage ou de substitution entraînent un risque élevé d'interruption – c'est pourquoi elles sont dites critiques.[43] Ce qui est passionnant, c'est que ces ressources, comme le manganèse, le phosphore ou certaines terres rares, peuvent encore être détectées dans diverses eaux. Cela offre un potentiel de recyclage, mais pose aussi le défi de traiter ces eaux pour éviter tout dommage aux humains, aux animaux et à l'environnement. La recherche dans ce domaine n'en est qu'à ses débuts et la mise en œuvre reste très coûteuse, du moins pour les eaux usées. Ces technologies sont déjà partiellement utilisées dans le traitement des eaux souterraines issues de l'industrie minière.[44] Vous trouverez plus d'informations sur les matières premières critiques et leur importance pour la Rhénanie-du-Nord-Westphalie dans le Green Economy Paper #2.

3.3 Protection des écosystèmes aquatiques

Le défi – de quoi s'agit-il ?

Outre l'approvisionnement en eau, les écosystèmes aquatiques mondiaux sont confrontés à des défis croissants liés au changement climatique, à l'urbanisation et à l'industrie. Et ce, bien qu'ils remplissent plusieurs fonctions vitales : ils nettoient, purifient, régulent et stockent l'eau, protègent contre les inondations, stabilisent le climat mondial et contribuent à la préservation de la biodiversité.[45] Il en ressort un champ de tensions: les écosystèmes aquatiques mondiaux sont d'une part soumis à une forte pression en tant que réserves naturelles, mais leur protection et leur gestion s'avèrent être une tâche essentielle pour la gestion de l'eau afin de rendre l'approvisionnement en eau et la protection contre les inondations plus résilients. Les défis à relever varient en fonction de la région, du type de cours d'eau et des conditions géographiques. La protection ou le rétablissement d'un état proche de l'état naturel des rivières et des lacs, la protection des glaciers et la protection des sols ou de leur capacité à absorber et à stocker l'eau (préservation de l'humidité des sols) sont essentiels. Un coup d'œil sur les eaux de l'Union européenne montre que la protection des écosystèmes aquatiques laisse à désirer dans toute l'UE. Seuls 38 % des eaux de surface de l'UE présentent un état écologique « bon » ou meilleur. Des pays comme le Luxembourg ou les Pays-Bas ne disposent actuellement d'aucune eau de surface en bon état. La République tchèque et l'Allemagne ne présentent qu'un faible pourcentage de cours d'eau en bon état écologiques.[46]

Le double défi consiste donc à améliorer la qualité des eaux et atténuer les conséquences du changement climatique sur les eaux. La préservation ou la remise en état des fonctions écologiques et de la biodiversité des écosystèmes aquatiques, en tenant compte des processus naturels tels que la capacité d'autoépuration des eaux et le≈cycle naturel de l'eau, est au cœur de cette problématique. La protection des écosystèmes aquatiques consiste donc en une utilisation durable des ressources aquatiques, en la restauration de structures proches de l'état naturel, telles que les cours naturels des ruisseaux et des rivières, et en la reconstitution de zones riveraines proches de l'état naturel, ainsi qu'en des mesures visant à améliorer la qualité de l'eau.[47] Pour améliorer la qualité de l'eau, il faut également minimiser les risques liés aux entrées de matières et autres substances polluantes, ce qui constitue un défi supplémentaire déjà décrit au chapitre 3.2. Contrairement aux risques spécifiques liés aux entrées de matières, comme les pesticides, les microplastiques ou les résidus de médicaments, la protection des écosystèmes aquatiques considère l'écosystème dans son ensemble.

L'Allemagne et la Rhénanie-du-Nord-Westphalie doivent aussi relever le défi et aborder la protection des écosystèmes aquatiques différemment selon le domaine concerné : l'Allemagne est divisée en trois types de paysages qui ont une influence sur les biocénoses aquatiques respectives : la plaine d'Allemagne du Nord, la chaîne de montagnes moyennes et la région des Alpes. Ces trois écorégions se distinguent par les types de leurs eaux – on trouve ainsi des paysages morainiques vallonnés et riches en lacs dans la plaine d'Allemagne du Nord, des marais et des landes dans le nord-ouest, tandis que la région alpine est caractérisée par de nombreux lacs. L'Allemagne se distingue également par dix districts hydrographiques. Le point commun de ces différents écosystèmes aquatiques est qu'ils sont soumis à une forte pression d'utilisation et de modification par la navigation, le développement urbain et l'agriculture. L'aménagement des cours d'eau en tant que voies navigables fédérales et la régulation des barrages ont entraîné la disparition de zones alluviales et d'habitats naturels. De même, les cours d'eau et leurs organismes vivants sont soumis à des pressions, entre autres, aux prélèvements d'eau par l'industrie et l'agriculture, ainsi qu'à l'apport de produits chimiques, tels que les médicaments ou les biocides, et de substances nutritives.[48] En outre, les ouvrages transversaux, c'est-à-dire les aménagements artificiels dans le lit des cours d'eau, peuvent entraîner la rétention de sédiments. Combinés à la rectification des rivières, ils entraînent souvent un déficit de dynamique alluviale et de possibilités de déplacement. Tout cela fait qu'en Rhénanie-du-Nord-Westphalie, par exemple, seuls 10 % environ de tous les cours d'eau peuvent être considérés comme étant dans un très bon ou un bon état écologique.[49] Même les zones marécageuses, importantes pour le régime des eaux, ont été en grande partie drainées pour donner plus d'espace à l'agriculture ou aux habitations. En Allemagne, seuls 2 % des surfaces marécageuses d'origine sont actuellement considérées comme proches de l'état naturel.[50]

Outre la protection de la biodiversité, des mesures telles que la renaturation des rivières ou la remise en eau des marais présentent d'autres avantages : les cours d'eau et les zones alluviales proches de l'état naturel ont une grande capacité à stocker le carbone présent dans l'air et servent ainsi de mesure naturelle de protection du climat. En même temps, ils offrent une possibilité de s'équiper contre différents événements météorologiques extrêmes, tels que la chaleur, les inondations ou les fortes pluies, et de devenir ainsi plus résilients face au climat. Grâce à la remise en eau des zones marécageuses, celles-ci peuvent également servir d'éponge en cas de fortes pluies et de crues et ainsi protéger contre les inondations. En outre, d'un point de vue global, les tourbières laissées à l'état naturel, bien qu'elles couvrent une part bien plus faible de la surface terrestre dans le monde, stockent deux fois plus de carbone que les zones forestières.

Il apparaît que les différents défis de la gestion de l'eau sont étroitement liés entre eux. La protection des écosystèmes aquatiques dépend d'une part de mesures visant à réduire les entrées de matières et substances polluantes. D'autre part, les mesures de protection des eaux favorisent en même temps les possibilités d'adaptation au climat. La protection et la régénération des écosystèmes fluviaux et alluviaux ont donc été définies comme une mesure prioritaire dans le cadre de la stratégie de l'UE en matière de biodiversité, basée sur le Green New Deal. Les applications dans la gestion de l'eau peuvent donc aller au-delà des aspects liés à la sécurité de l'approvisionnement et contribuer également à la protection des écosystèmes aquatiques naturels qui sont indispensables dans le contexte des exigences croissantes d'un avenir durable et résilient.[51]

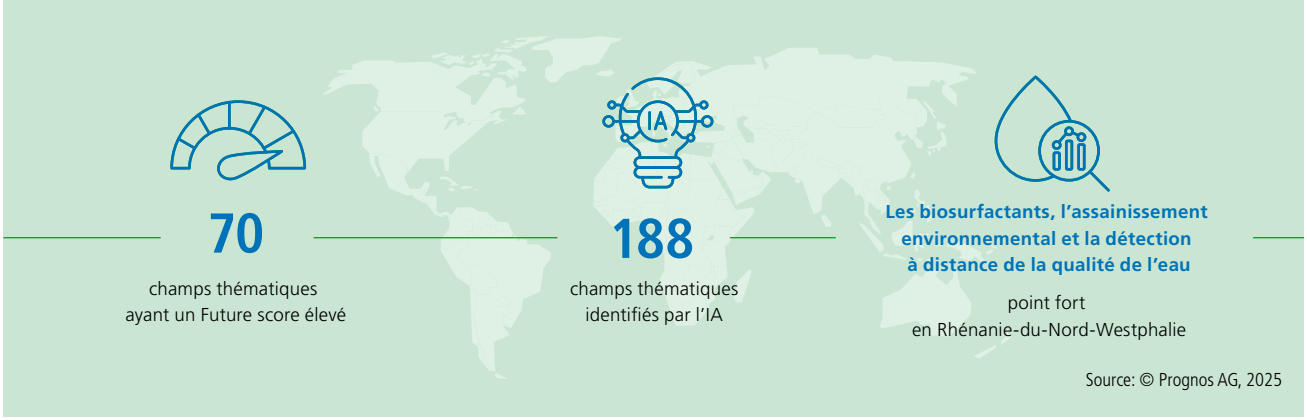
Solutions : protéger les écosystèmes aquatiques !

Le défi « protection des écosystèmes aquatiques » a pu être mis en relation avec un total de 188 champs thématiques issus de la recherche sur les thèmes de la gestion de l'eau. 70 de ces champs thématiques présentent un Future Score élevé ou plutôt élevé. Le paysage de la recherche en Rhénanie-du-Nord-Westphalie est moins axé sur ces champs de recherche. C'est pourquoi la Rhénanie-du-Nord-Westphalie présente une part plutôt faible de publications par rapport au paysage de recherche global. Les instituts de recherche de Chine et des États-Unis représentent la plus grande partie de la recherche dans ce domaine, mais la recherche de petits pays comme l'Irlande joue également un rôle visible. Des recoupements thématiques apparaissent notamment avec le thème des entrées de matières et autres substances polluantes de l'eau car une technologie de filtrage adaptée pour épurer les eaux usées est indispensable pour la protection des eaux (cf. chapitre 3.2). Ci-dessous les technologies de filtration pures sont exclues et l'accent est mis spécifiquement sur les innovations qui privilégient en particulier la protection des écosystèmes aquatiques.

Biosurfactants pour applications environnementales : les tensioactifs ont la propriété particulière de mélanger des substances hydrophiles et hydrophobes et permettent à l'huile de se dissoudre dans l'eau. Ils sont donc avant tout un composant important des produits de nettoyage.[52] Les biosurfactants sont produits à l'aide de micro-organismes et, contrairement aux tensioactifs fabriqués chimiquement, ils sont biodégradables, respectueux de l'environnement et moins toxiques. Ils gagnent notamment en importance dans l'assainissement des sols. Un exemple de leur efficacité est un tensioactif actif issu de la levure qui a pu éliminer du sable contaminé par du pétrole jusqu'à 97,8 % de ce polluant difficilement soluble.[53] Étant donné que les tensioactifs traditionnels contribuent souvent eux-mêmes à la pollution de l'environnement, les biosurfactants offrent une alternative durable et respectueuse de l'environnement pour des applications industrielles et écologiques étendues.[54]

Assainissement de l'environnement à base de charbon végétal : les sols contaminés ont un impact dangereux sur les écosystèmes. Les méthodes d'assainissement permettent de contenir et d'éliminer la contamination des sols en éliminant les polluants par différents procédés, comme le lavage ou le rinçage des sols. Le biochar est de plus en plus souvent utilisé pour assainir les sols pollués, notamment pour fixer les métaux lourds. Pour ce faire, la surface du biochar agit comme un aimant dans les sols à pH élevé et attire les polluants.[55] Les polluants sont ainsi fixés et ne peuvent plus être absorbés par les plantes ou entraînés dans les eaux souterraines. Parallèlement, son utilisation peut influencer positivement la croissance de certains organismes. La recherche porte entre autres sur la combinaison du biochar avec d'autres matériaux afin de

Graphique 7 : chiffres relatifs à la recherche dans le domaine du défi « protection des écosystèmes aquatiques »



Source: © Prognos AG, 2025

Le projet bioSpectre de la société Okeanos GmbH basée à Bochum a pour objectif de déterminer en temps quasi réel, à l'aide de capteurs innovants, des paramètres de qualité des eaux usées difficiles à mesurer.

renforcer l'effet de fixation des polluants.[56] La littérature mentionne toutefois régulièrement que des recherches supplémentaires sont nécessaires dans ce champ thématique afin d'étudier et de minimiser les risques écologiques et environnementaux potentiels liés à l'utilisation du biochar, comme par exemple la toxicité. Il faut mentionner ici qu'en Rhénanie-du-Nord-Westphalie aussi, on trouve des travaux de recherche dans ce champ thématique, mais par rapport à l'ensemble des publications de ces dernières années, la Rhénanie-du-Nord-Westphalie n'y est que faiblement représentée.

Télédétection pour la surveillance et l'évaluation de la qualité des eaux intérieures : la surveillance de la qualité de l'eau est très importante pour la protection des écosystèmes aquatiques afin de pouvoir intervenir à temps, par exemple en cas de pollution aiguë. En particulier, l'échantillonnage à grande échelle des eaux nécessite de nouvelles solutions pour garantir une surveillance dynamique et précise de la qualité de l'eau.[57] La télédétection pour la surveillance et l'évaluation de la qualité de l'eau dans les eaux intérieures offre de nouvelles possibilités dans la recherche. Grâce à l'utilisation d'images satellites et d'algorithmes avancés, les chercheurs peuvent collecter efficacement des données sur différents paramètres de la qualité de l'eau (comme la concentration d'algues, de matières en suspension comme le sable et l'argile ou de matières organiques colorées dissoutes) en dépit des contraintes spatiales et temporelles. Le prélèvement d'eau et l'évaluation de la qualité de l'eau, sur la base d'indicateurs tels que le pH ou la température, sont également des sujets centraux et ambitieux au niveau de la télédétection des eaux. Cependant, ces dernières années, ce domaine de recherche a fait des progrès considérables grâce à l'utilisation de drones et de l'IA.[58]

Évaluation des résultats

L'application de technologies et de méthodes avancées dans le domaine de l'assainissement de l'environnement et des eaux constitue un point fort de la recherche dans l'optique de la protection des écosystèmes aquatiques. Celles-ci peuvent servir à améliorer la qualité de l'eau et l'état écologique des cours d'eau. Pour surveiller la qualité de l'eau, il sera possible à l'avenir de recourir à la télédétection, aux capteurs et à l'apprentissage automatique. La recherche relève donc le défi de la « protection des écosystèmes aquatiques » à deux niveaux : d'une part, une meilleure surveillance permet de réagir plus rapidement à la pollution des écosystèmes aquatiques. D'autre part, des méthodes avancées permettent de garantir une protection plus efficace et plus respectueuse de l'environnement. Cependant, selon les données analysées ici, les instituts de recherche de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie avec leurs publications dans ces domaines n'y ont pas encore apporté de contribution significative..

3.4 Adaptation des infrastructures hydrauliques au climat

Le défi – de quoi s'agit-il ?

En Allemagne, l'infrastructure hydraulique permet d'approvisionner 97 à 99 % des ménages, des entreprises et du secteur public, tous secteurs confondus. Cet approvisionnement est assuré par un réseau d'eau potable de 554 000 km et un réseau d'eaux usées de 606 000 km.[59] À cela s'ajoutent de nombreuses infrastructures affiliées telles que des stations d'épuration, des barrages, des retenues et réservoirs d'eau, des puits ainsi que des centrales hydroélectriques. La gestion de l'eau ou l'infrastructure d'approvisionnement en eau fait partie des services d'intérêt général et des infrastructures critiques dont la sécurité de fonctionnement et d'exploitation est de plus en plus menacée par l'augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes. Cela ne vaut pas seulement pour l'Allemagne, mais partout dans le monde. Selon l'Agence fédérale allemande de l'environnement (UBA), le cycle de l'eau présente « une grande sensibilité aux changements climatiques » et est considéré comme l'un des « domaines hautement vulnérables ».[60] Il apparaît donc que l'infrastructure hydraulique en Rhénanie-du-Nord-Westphalie, en Allemagne et dans le monde doit s'adapter aux défis croissants posés par le changement climatique afin de pouvoir continuer à assurer ses fonctions d'approvisionnement de manière fiable.

L'année dernière (2024) a illustré à elle seule les conséquences dévastatrices des événements météorologiques extrêmes sur l'infrastructure hydraulique : en septembre, l'une des pires inondations depuis trois décennies a submergé une grande partie de l'Europe centrale. Des personnes ont été touchées en Allemagne, en Autriche, en Pologne, en Roumanie et en République tchèque.[61] En octobre, la région de Valence en Espagne a été touchée par une inondation dévastatrice[62] qui a rappelé en Allemagne la catastrophe de la vallée de l'Ahr en juillet 2021. Des précipitations extrêmes peuvent surcharger les infrastructures hydrauliques existantes dans un délai très court. Les rivières (qui ont souvent été rectifiées par le passé) débordent, tout comme les étangs de retenue. L'eau ne peut plus s'écouler par les voies habituelles et s'accumule rapidement au point le plus bas d'un lieu. Les sols imperméables ont souvent pour conséquence que l'eau y stagne dans un premier temps et ne peut pas s'écouler. Si elle s'écoule malgré tout, l'eau sale de la pluie ou de la rivière se mélange à l'eau sale dans les canalisations et est en partie évacuée sans être filtrée. Cela peut avoir des conséquences pour les écosystèmes récepteurs. Ces évolutions sont souvent très rapides et ne paralysent pas seulement l'approvisionnement en eau. Chaque inondation représente plutôt un danger pour les entreprises et les habitations, ainsi qu'un danger de mort.

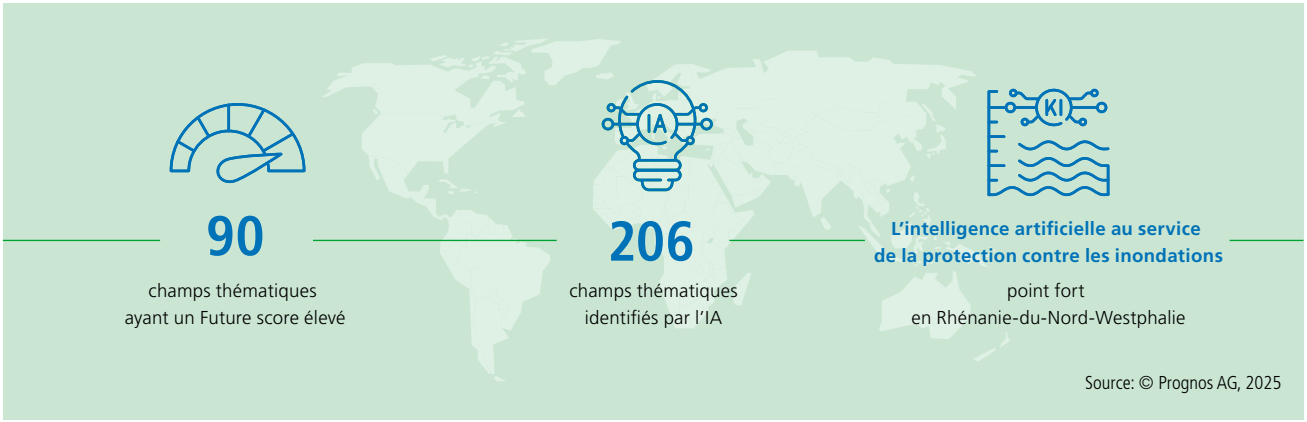
Une fois l'inondation surmontée, il faut généralement régler des montants élevés de dommages. Rien que les inondations de 2024 en Europe centrale, décrites au début, ont causé des dommages de 1,3 milliard d'euros en Autriche.[63] Dans ce contexte, on comprend vite pourquoi il est important de préparer l'infrastructure hydraulique existante, dans la mesure où cela est techniquement possible, aux défis croissants posés par les fortes pluies et les inondations. D'autant plus que la gestion de l'eau, avec ses prévisions de précipitations – et donc la charge d'eau attendue que les infrastructures telles que les réseaux de canaux et les bassins de rétention doivent gérer – s'appuie sur des données datant du siècle dernier qui ne sont pas transposables à une époque d'épisodes météorologiques extrêmes dynamiques et qui évoluent avec le changement climatique.[64] Pour faire face à ce problème, il faut de nouvelles méthodes d'évaluation et de saisie des données qui anticipent également à temps les épisodes soudains et inhabituels.

Solutions : adapter les infrastructures au changement climatique et aux conditions météorologiques extrêmes !

206 thèmes de recherche en rapport avec l'adaptation des infrastructures hydrauliques au climat ont été identifiés dans les données considérées. Parmi ces 206 thèmes de recherche 90 ont un Future Score élevé ou plutôt élevé. Les données examinées ont permis d'identifier des contributions exceptionnelles de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie et de son paysage de recherche sur le thème de « l'adaptation au climat des infrastructures hydrauliques, » notamment dans un domaine. Lorsqu'il s'agit de développer des applications permettant de prédire les inondations à l'aide de l'intelligence artificielle, les institutions de recherche de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie participent largement à la recherche et au développement internationaux :

L'intelligence artificielle au service de la prévision des crues et des inondations : les crues et les inondations sont une conséquence des phénomènes météorologiques extrêmes qui se multiplient à l'échelle mondiale en raison du changement climatique et qui mettent en danger aussi bien les infrastructures que les vies humaines. Afin d'assurer une protection maximale contre l'arrivée de masses d'eau et de garantir des délais de préalerte pour la protection civile, il est essentiel de prévoir avec précision les niveaux d'eau, les crues et les zones inondables. C'est pourquoi on développe de plus en plus de modèles de prévision basés sur l'IA ou l'apprentissage profond qui prévoient l'évolution des situations de crue sur la base de données historiques, de capteurs, de prévisions météoro-

Graphique 8 : chiffres relatifs à la recherche dans le domaine du défi « adaptation de l'infrastructure hydraulique au climat »



Source: © Prognos AG, 2025

logiques et/ou de modèles hydrologiques. De telles applications d'IA peuvent être utilisées dans le domaine de la gestion de l'eau afin d'identifier à temps les zones et les infrastructures menacées par les inondations et de mieux les préparer aux événements météorologiques extrêmes ou de mieux réagir aux situations d'inondation aiguë. Les premières applications de ce type approchent ou ont déjà atteint le stade de la commercialisation.[65]

Outre l'utilisation de l'IA pour la détection précoce, l'alerte et les prévisions d'inondations, d'autres thèmes de recherche internationaux présentent un haut niveau d'innovation. Les institutions de Chine et du Canada mais aussi de pays européens comme les Pays-Bas et la France sont particulièrement actives dans ce domaine. Deux de ces thèmes qui résultent du plus grand nombre de publications depuis 2020 en combinaison avec un Future Score élevé sont présentés plus en détail ci-dessous. Ici aussi, les technologies modernes telles que l'IA et les capteurs jouent un rôle prépondérant :

Prévision des ruptures de barrage basée sur l'apprentissage profond : les épisodes météorologiques extrêmes tels que les fortes pluies et les inondations représentent des contraintes extrêmes pour l'infrastructure hydraulique. Les digues et les barrages, par exemple, doivent retenir beaucoup plus d'eau que dans des conditions normales. Cela peut entraîner des dommages, des déformations et même, dans le pire des cas, des ruptures dans l'infrastructure de protection. Jusqu'à présent, il était difficile de calculer quand ou sous quelle pression une digue ou un barrage pouvait être endommagé. Les technologies de l'apprentissage profond pourraient à l'avenir fournir une meilleure base de données. En tenant compte des données météorologiques en temps réel et de différents facteurs d'alerte précoce, les applications basées sur l'apprentissage profond pourraient avertir à temps d'une surcharge de l'infrastructure et permettre ainsi d'agir en temps opportun.[66]

Détection et localisation des fuites dans les réseaux de distribution d'eau : en été et pendant les périodes de chaleur, de nombreuses régions du monde connaissent des pénuries d'eau. Dans le contexte de l'augmentation de la fréquence des jours de canicule, ce problème pourrait encore s'aggraver. Il est d'autant plus problématique qu'actuellement, environ 30 % de l'eau qui circule dans les systèmes de distribution d'eau dans le monde est gaspillée, par exemple à cause de canalisations anciennes et non étanches.[67] Afin de réduire ces pertes d'eau, des recherches sont menées sur différentes méthodes permettant de quantifier les fuites, de les détecter à temps et de les prévenir. La base est constituée par des capteurs en réseau qui enregistrent le flux d'eau et génèrent des données. Sur la base des mesures de pression et de débit, des modèles de calcul sont créés pour détecter les fuites dans le système de distribution d'eau, mais des modèles d'IA sont également développés à cette fin.[68] Ces méthodes ou technologies pourraient à l'avenir permettre de réduire les pertes d'eau. Il est également possible de créer des synergies avec le défi « Utilisation des sols compatible avec l'eau et résiliente au changement climatique en ville et à la campagne », car l'eau économisée peut être utilisée dans les régions urbaines et rurales.

Évaluation des résultats

Une tendance à l'innovation est clairement visible dans le domaine des infrastructures hydrauliques adaptées au climat : la mise en œuvre de technologies de numérisation telles que l'IA, les capteurs et les algorithmes. Cette évolution est judicieuse et prometteuse car elle renforce de manière décisive et rend plus efficace l'infrastructure déjà existante et fonctionnelle. Les applications d'IA aident à gérer les épisodes météorologiques extrêmes et à surveiller l'état de l'infrastructure hydraulique. Une infrastructure hydraulique numérisée peut ainsi mieux faire face à des événements météorologiques extrêmes

de plus en plus fréquents. Outre la recherche en Rhénanie-du-Nord-Westphalie, des initiatives économiques font également avancer la tendance à la numérisation. On peut donc en conclure la chose suivante : lorsqu'il s'agit d'adapter les infrastructures existantes au climat ou d'en développer de nouvelles, la Rhénanie-du-Nord-Westphalie offre des voies d'innovation prometteuses.

3.5 Utilisation des sols compatible avec l'eau et résiliente au climat en ville et à la campagne

Le défi – de quoi s'agit-il ?

La manière dont nous utilisons les sols et les terres détermine en grande partie l'avenir de nos moyens de subsistance. Une utilisation durable des terres est non seulement décisive pour atteindre la neutralité en matière de gaz à effet de serre et pour préserver la flore et la faune, mais aussi pour stabiliser le régime hydraulique naturel et protéger nos ressources en eau. Parallèlement, un régime hydraulique stable est une condition nécessaire pour une utilisation des terres adaptée à l'avenir.[69]

Environ un tiers de la surface totale de notre planète – 4,78 milliards d'hectares – est aujourd'hui utilisé à des fins agricoles,[70] en Rhénanie-du-Nord-Westphalie, cela représente même près de la moitié de la surface du Land.[71] Aucun secteur ne consomme autant d'eau que l'agriculture : 72 % de l'eau douce utilisée dans le monde est destinée à la production de denrées alimentaires. Il ne fait aucun doute que l'agriculture, avec la production de denrées alimentaires et d'aliments pour animaux, joue un rôle clé dans l'approvisionnement de nos sociétés, surtout dans le contexte d'une population mondiale croissante et d'une augmentation du niveau de vie. Toutefois, ces évolutions s'accompagnent également d'une augmentation des besoins en ressources, ce qui se traduit par une extension des surfaces agricoles, une intensification de l'utilisation des terres et une augmentation des besoins et de la consommation d'eau. Ainsi, une part sans cesse croissante des sols cultivés doit être irriguée artificiellement, elle représente aujourd'hui environ 20 % des sols cultivés dans le monde, soit un chiffre qui a doublé depuis 1961.[72]

La situation est encore aggravée par les conséquences du changement climatique qui limitent déjà la disponibilité de l'eau pour l'agriculture, avec de nettes différences régionales. Même si l'Allemagne fait partie des pays les plus riches en eau de l'UE, elle doit de plus en plus recourir à l'irrigation artificielle, notamment pour la culture des légumes.[73] Pour pouvoir maintenir les cultures actuelles, on s'attend à ce que les besoins en irrigation soient multipliés par vingt en Rhénanie-du-Nord-Westphalie d'ici la fin du siècle.[74]

L'intensification de l'utilisation des terres n'entraîne toutefois pas seulement une augmentation des besoins en eau, elle influence également la qualité de l'eau. Ainsi, l'azote est de plus en plus épandu sous forme d'engrais minéraux. Il en résulte un excédent d'azote qui se retrouve en partie sous forme de nitrates dans les eaux souterraines et de surface, ce qui nuit considérablement aux ressources en eau. La situation est similaire en ce qui concerne la pollution par les pesticides (voir chapitre 3.2). Il apparaît clairement que la qualité de l'eau est étroitement liée au type et à l'intensité de l'utilisation des terres.

L'urbanisation continue de croître rapidement dans le monde. Selon les prévisions, près de 70 % de la population mondiale vivra dans les villes en 2050.[75] En 2016, plus de 30 % de la population urbaine vivait déjà dans des zones où l'eau était rare. Les moteurs de cette situation sont le manque d'eau de surface, l'imperméabilisation des sols, la surexploitation des nappes phréatiques ainsi que l'augmentation de la demande en eau due à l'urbanisation rapide et à l'augmentation de la demande par habitant. En raison du changement climatique, les sécheresses vont continuer à augmenter dans le monde entier et aggraver cette situation.[76] Le nombre de personnes au niveau mondial vivant dans des villes où l'eau est rare pourrait passer de plus de 933 millions en 2016 à 1,6 à 2,3 milliards de personnes en 2050. Une étude de l'Université d'Oxford a également révélé que l'urbanisation croissante et la forte demande en eau qui en résulte dans les villes entraînent un détournement de l'eau des zones rurales vers les villes. Conséquence : dans les zones rurales, le risque de sécheresse et de conflit augmente.[77] En l'absence d'un traitement adéquat des eaux usées urbaines, celles-ci peuvent en outre constituer une charge importante pour les eaux souterraines et les eaux de surface.

L'augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes pose en outre d'énormes défis à nos infrastructures actuelles de distribution d'eau, comme nous l'avons vu au chapitre 3.4. De plus en plus souvent, les fortes pluies font que les canalisations et les cours d'eau urbains ne peuvent plus contenir l'augmentation du ruissellement de surface, ce qui entraîne une augmenta-

tion des crues soudaines et des inondations. En outre, l'utilisation accrue de l'espace dans les villes et la forte imperméabilisation des sols font qu'il n'y a pas suffisamment de sols disponibles pour l'infiltration. En outre, le haut degré d'imperméabilisation des villes et le manque d'espaces verts entraînent une augmentation de l'apparition d'îlots de chaleur.[78]

En principe, les villes dépendent fortement de leur voisinage pour leur approvisionnement en eau. L'utilisation des sols et les changements d'utilisation des sols dans leur voisinage ont donc une influence considérable sur l'approvisionnement en eau des villes. Les utilisations de l'eau dans les villes peuvent à leur tour entraîner une concurrence avec les utilisations dans le voisinage, par exemple entre différents utilisateurs de l'eau tels que l'agriculture, le service public de l'eau, la protection de la nature ou encore le tourisme et l'irrigation dans les zones urbaines. De même, des besoins différents en matière d'espace peuvent entraîner des conflits entre la ville et la périphérie. Cela peut être le cas, par exemple, lorsque des sols normalement destinés à la gestion des risques d'inondation (comme les zones de rétention) ou à l'approvisionnement en eau (comme les zones de protection des eaux) sont réaffectées à d'autres fins, comme la production d'énergie ou la culture de denrées alimentaires ou de fourrage, au profit de zones urbaines situées en périphérie.[79]

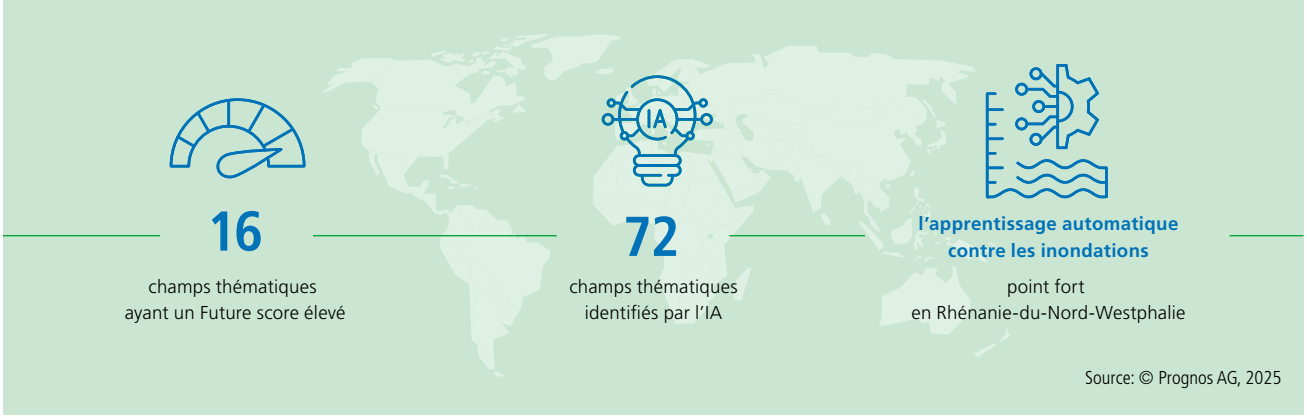
Solutions : organiser l'utilisation des sols en ville et à la campagne de manière à ce qu'elle soit compatible avec les cours d'eau et résiliente au climat !

Au total, 72 thèmes de recherche en rapport avec le défi « Utilisation des sols compatible avec l'eau et résiliente au climat en ville et à la campagne » ont pu être identifiés. Seuls 16 d'entre eux présentent un Future Score élevé ou plutôt élevé. Le paysage de la recherche de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie présente dans l'un de ces 16 champs de recherche une part de plus de 6 % des publications parues et participe ainsi de manière significative au travail de recherche international :

Prévision et modélisation des inondations urbaines par l'apprentissage automatique : Comme les villes sont particulièrement touchées par les inondations en raison d'une forte densité de population et d'une forte imperméabilisation, le moment de l'alerte constitue un facteur essentiel pour atténuer au mieux les conséquences de telles catastrophes, préparer les infrastructures de manière adéquate et sauver des vies humaines. À cette fin, l'utilisation de l'IA et de l'apprentissage automatique pour la prévision des crues et des inondations a pris de l'importance ces dernières années, comme en témoigne le nombre élevé de publications dans ce domaine. En particulier, les modèles pilotés par les données et utilisant des réseaux neuronaux artificiels donnent des résultats prometteurs et réduisent les temps de calcul des simulations basées sur la physique.[80] L'utilisation de la technologie de prévision des crues basée sur l'IA ne se limite pas, comme décrit ci-dessus, à l'application dans le domaine des infrastructures critiques. Au contraire, les entreprises et les communes peuvent également profiter de l'utilisation d'une telle technologie dans les zones urbaines afin d'améliorer leur propre protection contre les inondations et d'identifier les points faibles et les dangers.

Certes, la Rhénanie-du-Nord-Westphalie présente une faible part de champs de recherche pertinents dans toutes les autres publications identifiées depuis 2020, mais dans le contexte international, on peut identifier d'autres axes de recherche qui contribuent à relever le défi, notamment en ce qui concerne la lutte contre la pénurie d'eau dans les zones rurales. La recherche menée par des institutions de Chine, des États-Unis, d'Espagne et de Corée du Sud,

Graphique 9 : chiffres relatifs à la recherche dans le domaine du défi : « utilisation des sols compatible avec les eaux en ville et à la campagne »



Source: © Prognos AG, 2025

La plus grande installation au monde de capteurs de brouillard est composée de CloudFisher de la WasserStiftung (Fondation pour l'eau) sur le mont Boutmezguida au Maroc.

entre autres, y est fortement représentée. Trois autres thèmes d'innovation importants sont présentés ci-dessous. Ils ont été identifiés en combinant le plus grand nombre de publications depuis 2020 avec un Future Score élevé ou plutôt élevé.

Technologies inspirées de la nature pour la production d'eau à partir de la brume : cette approche se réfère au développement de technologies pour la production efficace d'eau sur la base de la bionique, c'est-à-dire la transposition de phénomènes naturels sur la technique. Le scarabée du désert du Namibie, les (toiles d') araignées ou les espèces végétales comme les cactus qui vivent dans des régions du monde particulièrement sèches, sont considérés comme des modèles à cet égard. En cas de chaleur et de sécheresse, l'eau s'évapore souvent avant de pouvoir être collectée. Certains matériaux permettent toutefois d'extraire l'eau et de l'évacuer rapidement. C'est ainsi que la recherche actuelle se consacre au développement de collecteurs de brume très efficaces qui misent sur des structures de surface similaires à celles que l'on trouve par exemple sur le dos du scarabée du désert ou sur les épines des cactus.[81] Dans les régions côtières et montagneuses notamment, la brume est fréquente et peut être captée au moyen de collecteurs ou de réseaux de brume et être utilisée pour l'approvisionnement en eau. Ce domaine de recherche présente notamment un grand potentiel pour les régions ayant un accès limité à l'eau potable.

Gestion optimisée de l'eau pour les arbres fruitiers dans les régions arides / semi-arides (très sèches / sèches) : l'adaptation de l'irrigation et des techniques d'irrigation est de plus en plus nécessaire dans le domaine de la culture des plantes afin de lutter contre les risques de sécheresse et d'aridité tout en maintenant la productivité et en contribuant à la sécurité alimentaire.[82] Dans ce contexte, le champ de recherche se consacre à la question de savoir comment utiliser de manière optimale l'eau et les engrais dans la culture fruitière dans les régions arides et semi-arides. Il ressort de la recherche que l'irrigation traditionnelle n'offre pas de solution durable en raison du changement climatique et de la disponibilité de l'eau qui en résulte, en cas d' utilisations concurrentes de l'eau. Des recherches intensives sont donc menées pour développer des technologies d'irrigation à faible consommation d'énergie et d'eau afin d'augmenter les rendements et d'éviter la dégradation des sols, par exemple en utilisant l'irrigation souterraine avec des buses en céramique.[83] En outre, différentes techniques pour économiser l'eau telles que la récupération de l'eau de pluie et l'irrigation goutte à goutte dans les vergers de pommiers sont comparées en termes d'efficacité d'utilisation de l'eau[84] ou bien des recherches sont menées

sur la quantité d'eau qui peut être économisée grâce à l'irrigation déficitaire* sur différents arbres fruitiers.[85] D'autres études portent sur le développement de modèles d'irrigation en temps réel en utilisant des images thermiques de la cime des arbres.[86]

Utilisation d'hydrogels dans l'agriculture : les hydrogels que nous rencontrons constamment dans la vie quotidienne, par exemple dans les cosmétiques ou les produits d'hygiène comme les couches ou dans l'industrie de l'emballage[87] suscitent également de plus en plus d'intérêt dans l'agriculture mondiale. Les hydrogels sont des polymères superabsorbants (SAP) qui peuvent absorber et stocker de grandes quantités d'eau et de nutriments végétaux. Ils peuvent ainsi augmenter considérablement l'efficacité de l'utilisation de l'eau et des nutriments dans l'agriculture et soutenir les plantes, en particulier pendant les périodes de sécheresse.[88] La recherche montre par exemple que l'eau stockée dans les hydrogels au niveau des racines des plantes est libérée lentement dès que le sol commence à s'assécher. Ainsi, ils augmentent non seulement l'efficacité de l'utilisation de l'eau, mais prolongent également les intervalles d'irrigation tout en réduisant les coûts d'irrigation et en fournissant aux plantes les nutriments nécessaires.[89] Dans le contexte de l'augmentation de la demande en eau dans l'agriculture et de la diminution de la disponibilité de l'eau, les hydrogels peuvent jouer un rôle important dans l'utilisation plus efficace de l'eau.

Réduction électrochimique de l'azote pour la synthèse de l'ammoniac : l'ammoniac (NH_3), un composé d'azote et d'hydrogène, est l'un des principaux produits chimiques au monde. Environ 80 % du NH_3produit est utilisé comme engrais. D'une part, ce produit chimique est donc d'une grande importance pour l'approvisionnement alimentaire de la population mondiale.[90] D'autre part, la majeure partie des nitrates qui se répandent aujourd'hui dans l'environnement et qui polluent de plus en plus nos eaux de surface et souterraines provient de l'utilisation excessive d'engrais azotés. Le procédé conventionnel Haber-Bosch permet de produire de l'ammoniac à grande échelle.[91] Ce procédé implique une réaction entre l'hydrogène et l'azote dans des conditions de température et de pression élevées – un processus très gourmand en énergie, qui génère environ 1 % des émissions annuelles de gaz à effet de serre dans le monde.[92] Dans ce contexte, la recherche sur les procédés durables de production d'ammoniac s'intensifie depuis quelques années, la réduction électrochimique de l'azote étant notamment considérée comme une approche prometteuse. Contrairement au procédé Haber-Bosch, ce procédé extrait l'azote des eaux (usées) contenant des nitrates et peut être réalisé avec de l'électricité provenant idéalement de sources durables telles que l'énergie éolienne et solaire. Dans l'ensemble, la réduction électrochimique de l'azote pour la synthèse de l'ammoniac offre le potentiel de promouvoir une agriculture plus durable en rendant la production d'engrais ammoniacaux plus respectueuse de l'environnement et en réduisant à la fois les émissions de CO_2 et la pollution par les nitrates dans les flux d'eaux usées. La possibilité d'une production décentralisée et l'utilisation d'énergies renouvelables font de ce procédé une technologie prometteuse pour une agriculture plus verte et plus respectueuse des ressources et des eaux.

Évaluation des résultats

Dans l'ensemble, on constate que la Rhénanie-du-Nord-Westphalie est à l'origine de contributions à la recherche qui sont fortement liées à l'apprentissage automatique et aux prévisions des crues basées sur cet apprentissage et qui favorisent la résilience climatique urbaine liée à l'eau. En revanche, on trouve dans le contexte international une série de contributions innovantes pour l'optimisation de l'utilisation de l'eau dans les zones rurales. Des contributions à la production d'eau dans les régions arides, aux solutions d'économie d'eau dans l'agriculture, en passant par des approches de réduction des nitrates dans les eaux usées agricoles avec production simultanée d'ammoniac – dans l'ensemble, les approches de solution mettent clairement l'accent sur la durabilité environnementale.Tous les axes prioritaires de la recherche en Rhénanie-du-Nord-Westphalie classés selon le défi auquel ils contribuent sont résumés dans le graphique 10.

* L'irrigation déficitaire désigne l'irrigation ciblée de cultures avec moins d'eau que leurs besoins réels afin d'obtenir une production maximale par unité d'eau consommée.

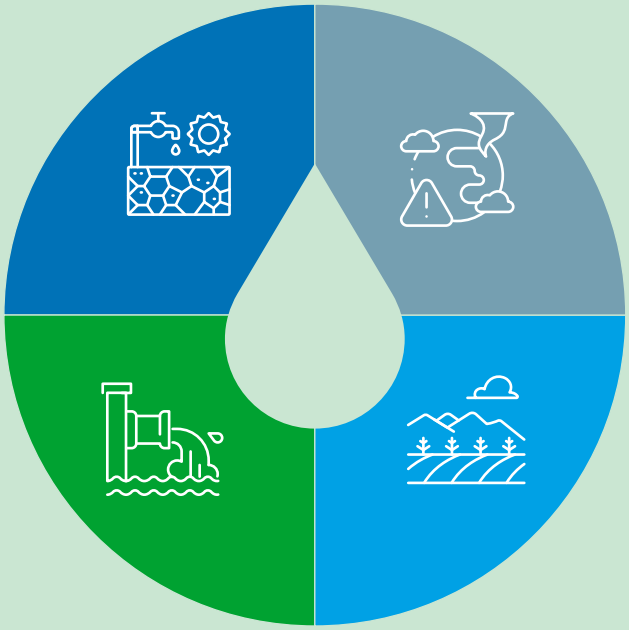
Graphique 10 : domaines de recherche prioritaires en Rhénanie-du-Nord-Westphalie classés selon les défis liés à la gestion de l'eau

Pénurie de l'eau

- **Dessalement et traitement de l'eau** à base de solvants

Risques liés aux entrées de matières

- Elimination et traitement des **phosphonates**
- Analyse et quantification des **microplastiques**
- Membranes à motifs
- Membranes polyelectrolytes et **multicouches**
- **Elimination des antibiotiques** par désinfection au chlore



Adaptation de l'infrastructure hydraulique au climat

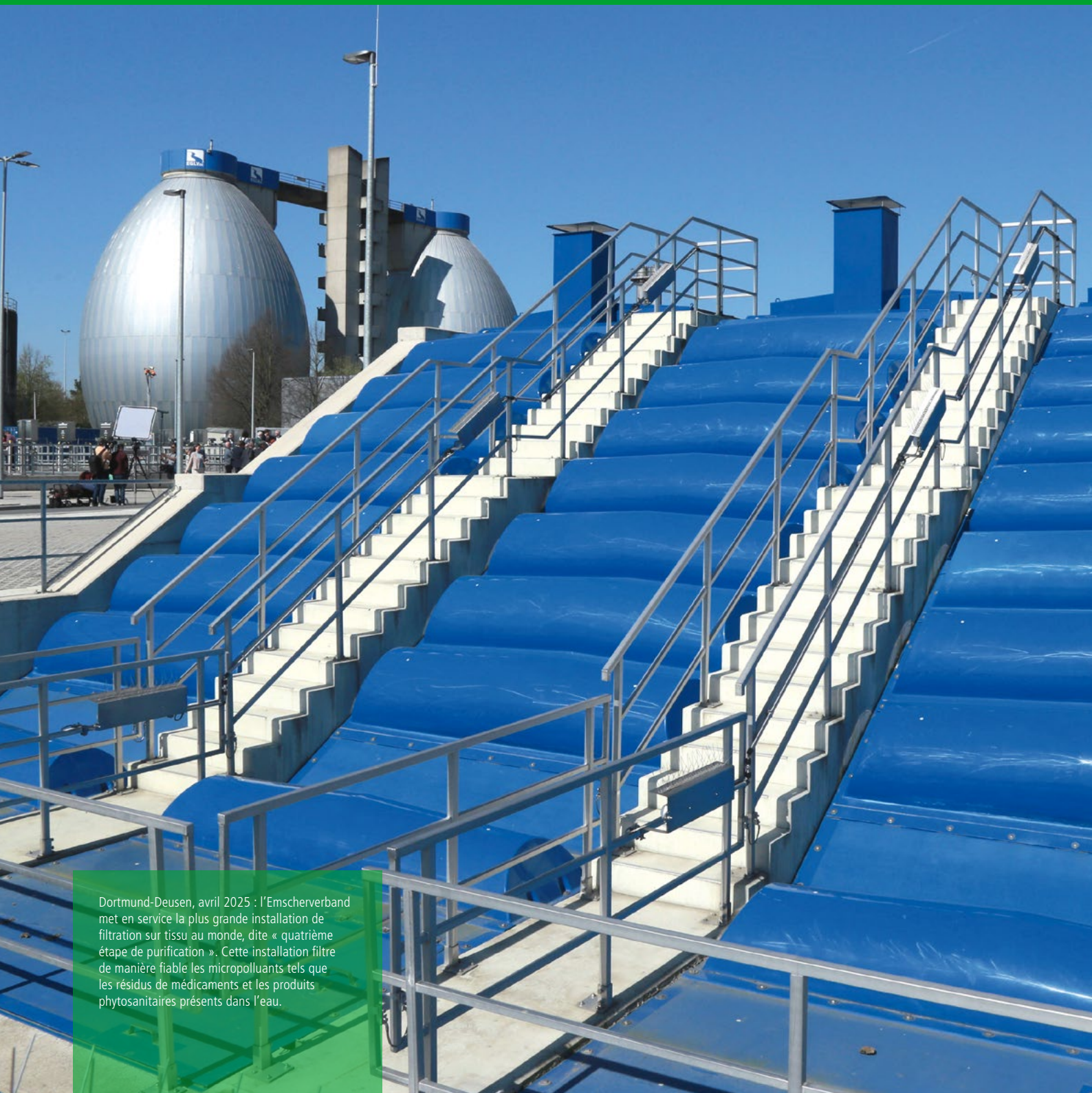
- Utilisation de l'**IA** pour prédire crues et inondations

Utilisation des sols compatibles avec l'eau et résiliente au climat

- **Prévision et modélisation des inondations** dans les villes grâce à **l'apprentissage automatique**

Source: © Prognos AG, 2025

4 Mégatendances et technologies dans la gestion de l'eau

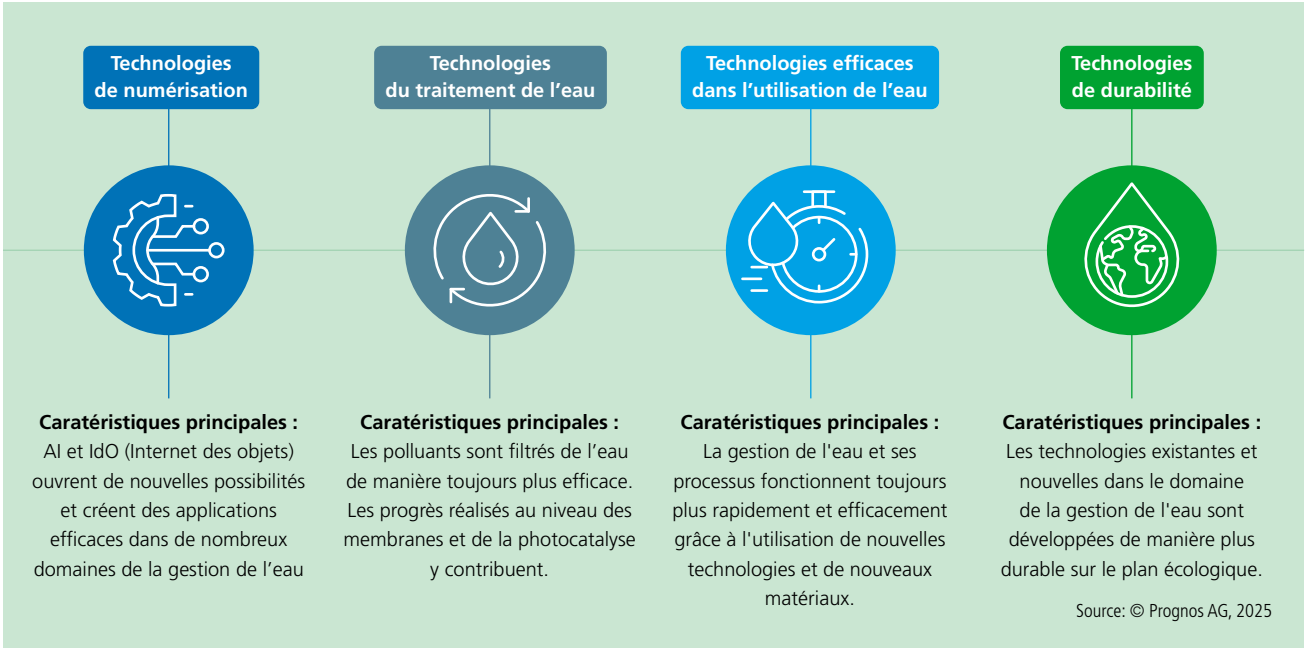


Dortmund-Deusen, avril 2025 : l'Emscherverband met en service la plus grande installation de filtration sur tissu au monde, dite « quatrième étape de purification ». Cette installation filtre de manière fiable les micropolluants tels que les résidus de médicaments et les produits phytosanitaires présents dans l'eau.

La présentation des principaux défis de la gestion de l'eau, d'une part, et l'analyse des nombreuses solutions proposées, d'autre part, dans le chapitre précédent ont montré une chose : Le fort potentiel d'innovation dans la gestion de l'eau tient compte de l'importance du sujet et des dimensions des défis. La recherche est si vaste qu'il n'est pas possible d'analyser tous ses développements dans le cadre du présent document. Cependant, afin de couvrir le plus grand nombre de résultats possibles, l'analyse des données a systématiquement recherché des corrélations au sein de tous les thèmes. Quatre mégatendances ont ainsi pu être identifiées qui permettent de représenter les grandes lignes qui se dessinent dans l'ensemble des 1.200 thèmes reconnus par l'analyse de l'IA.

Ces mégatendances sont des thèmes généraux qui illustrent la recherche de nombreux champs thématiques individuels. Elles peuvent être comprises comme des directions thématiques dont on peut supposer qu'elles marqueront considérablement la gestion de l'eau dans le monde dans les années à venir. Ces mégatendances sont présentées en détail ci-dessous :

Graphique 11 : un aperçu des 4 mégatendances de la gestion de l'eau



Source: © Prognos AG, 2025

4.1 Technologies de numérisation

Le monde a radicalement changé en termes d'applications intelligentes et numériques au cours des cinq dernières années. Au plus tard depuis la sortie de l'application ChatGPT d'OpenAI en novembre 2022, l'intelligence artificielle a fait son entrée dans nos vies. Et la gestion de l'eau est également concernée par ces évolutions à plusieurs niveaux. L'IA est par exemple utilisée pour prévoir les fortes pluies et les inondations, afin de mieux préparer les infrastructures et de protéger les zones urbaines (voir 3.4 et 3.5). En outre, l'IA trouve des applications dans la gestion et la fourniture de l'eau. Ainsi, les outils d'IA peuvent calculer, sur la base de données historiques, la consommation d'eau (par exemple dans une ville) à un moment donné, ce qui permet de fournir la ressource de manière plus efficace et ciblée.[93] En outre, l'IA est utilisée dans le traitement des eaux usées, par exemple pour contrôler les processus d'épuration ou l'encrassement des membranes). Des recherches sont menées dans d'autres domaines d'application dans le contexte des eaux usées.[94] L'Internet des objets (IdO) est également un facteur d'innovation pour la gestion de l'eau. C'est précisément dans le domaine de la surveillance et du contrôle des processus que l'utilisation de technologies interconnectées et communicantes (comme les capteurs et les appareils de

mesure intelligents) joue un rôle important. Il est par exemple possible de contrôler en permanence des paramètres physiques et chimiques et de les évaluer en temps réel afin de pouvoir réagir rapidement aux changements qui surviennent. Les applications IdO peuvent également aider l'agriculture à s'approvisionner en eau, par exemple en signalant le niveau d'irrigation des plantes et en avertissant ainsi de la pénurie d'eau et de l'excès d'eau.[95] Les possibilités devraient également s'élargir considérablement dans les années à venir à l'interface de l'IA et de l'Internet des objets. En ce qui concerne les outils et les développements numériques spécifiques, il vaut la peine de se référer à la partie précédente 3.2 du présent document.

4.2 Technologies de traitement de l'eau

Comme nous l'avons vu lors de la description des défis de la gestion de l'eau au chapitre 3 des substances potentiellement dangereuses se retrouvent dans l'environnement via les eaux usées et menacent la santé des hommes et des animaux ainsi que l'état des écosystèmes. C'est le cas, par exemple, des antibiotiques et autres résidus de médicaments, des microplastiques, des produits chimiques industriels, mais aussi des engrais et des germes résistants aux antibiotiques. Afin d'éviter à l'avenir que l'eau contaminée n'atteigne les cours d'eau ou ne sorte du robinet, des méthodes efficaces de traitement de l'eau font l'objet de recherches variées. La plupart du temps, il s'agit de faire progresser des domaines de recherche déjà établis. La technologie membranaire en est un bon exemple (voir également le point 3.2). Elle est utilisée depuis des années pour la purification (en particulier la filtration) de l'eau afin d'éliminer les particules (bactéries et virus) et les substances. La technologie est en constante évolution et de nouvelles possibilités de filtration, c'est-à-dire des substances qui peuvent être extraites de l'eau à travers les membranes, font l'objet de recherches. Par exemple, les membranes polyélectrolytes multicouches qui filtrent même les plus petites particules et les microbes de l'eau. Des membranes à motifs qui s'encrassent elles-mêmes moins rapidement, des membranes capables de filtrer les métaux lourds des eaux usées[96] ou celles qui séparent l'huile de l'eau.[97] Une autre technologie qui fait l'objet de recherches de plus en plus intenses depuis quelque temps et qui est de plus en plus utilisée pour le traitement et la purification de l'eau est la photocatalyse. Des matériaux tels que les semi-conducteurs que sont le dioxyde de titane et l'oxyde de zinc sont utilisés en combinaison avec la lumière afin de provoquer ou d'accélérer des réactions chimiques dans l'eau. Différentes techniques de photocatalyse permettent de décomposer ou de désinfecter les substances nocives et les agents pathogènes présents dans l'eau.[98] C'est le cas, par exemple, de certains colorants, des résidus de médicaments, des pesticides et des

Espaces verts urbains connectés : la ville fédérale de Bonn teste l'utilisation de capteurs d'humidité en temps réel afin d'irriguer de manière optimale les jeunes arbres particulièrement sensibles à la sécheresse.

produits chimiques industriels. Un autre grand avantage de la photocatalyse est qu'elle n'a pas recours à la chimie pour mettre en œuvre les processus de dégradation, contrairement à de nombreuses méthodes traditionnelles. Cependant, certains facteurs font encore obstacle à une utilisation généralisée de la méthode, par exemple une efficacité parfois encore plus faible que celle des méthodes traditionnelles et la nécessité d'une exposition permanente et optimale à la lumière, ce qui n'est pas le cas dans toutes les conditions. D'autres technologies de traitement de l'eau font l'objet de nombreuses recherches, notamment l'utilisation de nanomatériaux (nanotubes de carbone, nanoparticules d'argent et de cuivre, par exemple) pour filtrer la pollution qui n'est pas détectée par la première, deuxième et troisième étape du traitement.[99]

4.3 Technologies d'efficacité hydrique

Une autre mégatendance générale met l'accent sur l'utilisation optimisée et efficace de l'eau dans différents domaines de la gestion de l'eau et dans les secteurs connexes. Par exemple, l'utilisation de la technologie des capteurs et de l'IA pour trouver des solutions permettant de détecter précisément et rapidement les fuites afin d'éviter les pertes d'eau inutiles fait l'objet de recherches. Cette nécessité s'exprime également par le fait que, dans le monde entier, les pertes d'eau dépassent 30 % dans la plupart des réseaux de distribution d'eau (cf 3.4).[100] Les technologies innovantes visant à accroître l'efficacité de l'utilisation de l'eau peuvent jouer un rôle important non seulement pour améliorer l'efficacité des infrastructures hydrauliques, mais aussi pour le traitement de l'eau. L'efficacité de l'eau est également requise dans des secteurs tels que la production d'acier, de pâte à papier et de papier, ainsi que dans l'industrie chimique, pétrolière et l'industrie du gaz – car, en fin de compte, ces secteurs industriels comptent parmi les plus gros consommateurs d'eau au monde. Les nouvelles technologies peuvent ici jouer un rôle décisif pour économiser l'eau dans les différents processus – de la production au traitement, en passant par le lavage, le refroidissement et le transport.[101] L'utilisation de technologies efficaces en matière d'eau suscite également une grande attention dans l'agriculture. Dans ce domaine, les recherches portent notamment sur les technologies d'irrigation intelligente et automatisée utilisant l'IdO et l'automatisation. L'objectif est de faire correspondre au mieux l'irrigation aux besoins en eau des plantes et de ne pas gaspiller l'eau inutilement.[102] Dans l'ensemble, on constate que: la pénurie croissante d'eau stimule le développement d'innovations dans le domaine de l'efficacité hydrique dans différents secteurs à travers le monde. L'importance de l'innovation dans ce domaine se reflète également dans la stratégie européenne pour un approvisionnement en eau résilient

La rénovation de l'infrastructure du réseau, comme ici à Hattingen, à l'aide d'un procédé d'insertion de gaines, permet de prévenir les fuites dans le réseau de canalisations.

annoncée pour le deuxième trimestre 2025. Concrètement, la ligne directrice « L'efficacité de l'eau d'abord » stipule que « la réduction de la consommation d'eau et des prélèvements d'eau grâce à une meilleure efficacité et une économie circulaire renforcée »[103] est essentielle pour l'approvisionnement en eau et donc pour le bien-être et la compétitivité de l'Europe.

4.4 Technologies de durabilité

Avec l'Agenda 2030 et le Pacte vert pour l'Europe, l'Union européenne s'est fixée pour objectif de promouvoir le développement durable à l'échelle mondiale et de parvenir à la neutralité climatique dans l'UE d'ici 2050. Ces décisions ont ouvert la voie à une transition verte dans tous les secteurs, de l'industrie aux transports, en passant par le bâtiment et l'énergie. Le Pacte pour une industrie propre (Clean Industrial Deal) présenté par la Commission européenne en février 2025 a pour objectif complémentaire de garantir la compétitivité et la neutralité climatique de l'UE. Il n'est donc pas surprenant que cette tendance se reflète également dans les données considérées ici. Dans tous les domaines de recherche, il apparaît que le développement de technologies (existantes) dans une direction écologiquement durable constitue un thème central. Par exemple, les procédés de traitement de l'eau sont combinés à l'utilisation de sources d'énergie renouvelables, par exemple dans les processus de dessalement à l'énergie solaire. Parallèlement, la recherche montre que l'utilisation de substances et de matériaux beaucoup plus écologiques et biodégradables que leurs équivalents conventionnels est de plus en plus étudiée, comme l'utilisation de biosurfactants pour la dégradation des polluants (voir chapitre 3.3) ou l'utilisation d'hydrogels pour une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau (voir chapitre 3.5). Dans l'ensemble, les procédés existants deviennent ainsi plus durables et plus attrayants pour les applications futures.

Graphique 12 : répartition mondiale des publications dans les champs thématiques présentant un Future Score élevé, 2020–2024

Pourcentage des publications mondiales ayant obtenu un Future Score élevé auprès des institutions scientifiques nationales.

Source: © Prognos AG, 2025

5 Classement des résultats par rapport à la Rhénanie-du-Nord-Westphalie : associer les innovations aux stratégies politiques et aux structures existantes

Depuis le début de la restructuration de l'Emscher, le plus grand défi en matière de gestion de l'eau en Rhénanie-du-Nord-Westphalie consiste à transformer les sites miniers à ciel ouvert de la région rhénane en un paysage de lacs attrayant.

La gestion de l'eau en Rhénanie-du-Nord-Westphalie, en Europe et dans le monde est actuellement confrontée à une multitude de défis disruptifs et complexes souvent liés entre eux. La pénurie croissante d'eau, les écosystèmes aquatiques menacés, l'eau contaminée par des polluants, l'adaptation nécessaire de l'infrastructure hydraulique au changement climatique ainsi que la nécessité d'une utilisation plus durable des sols en ville et à la campagne – cette longue liste illustre la nécessité d'agir pour maintenir le bon fonctionnement de la gestion de l'eau à l'avenir et l'adapter aux nouvelles conditions.

Pour y parvenir, il convient d'orienter l'action politique au niveau international, national et du Land de Rhénanie-du-Nord-Westphalie selon des directives structurelles claires et d'intégrer les innovations issues de la recherche et du développement. Des programmes tels que la stratégie d'adaptation au climat de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie* et la stratégie d'avenir pour l'eau de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie, en cours d'élaboration, fournissent des orientations. Ces deux stratégies régionales font partie intégrante d'une politique globale visant à garantir la pérennité et la stabilité climatique des ressources en eau en Rhénanie-du-Nord-Westphalie. Des points d'ancrage pour l'intégration de l'innovation et de la recherche se trouvent en outre dans les projets d'infrastructure et d'adaptation climatique existants du Land. Avec une telle approche intégrée, la Rhénanie-du-Nord-Westphalie peut également jouer un rôle de pionnier au niveau international dans la mise en œuvre d'innovations dans la gestion de l'eau.

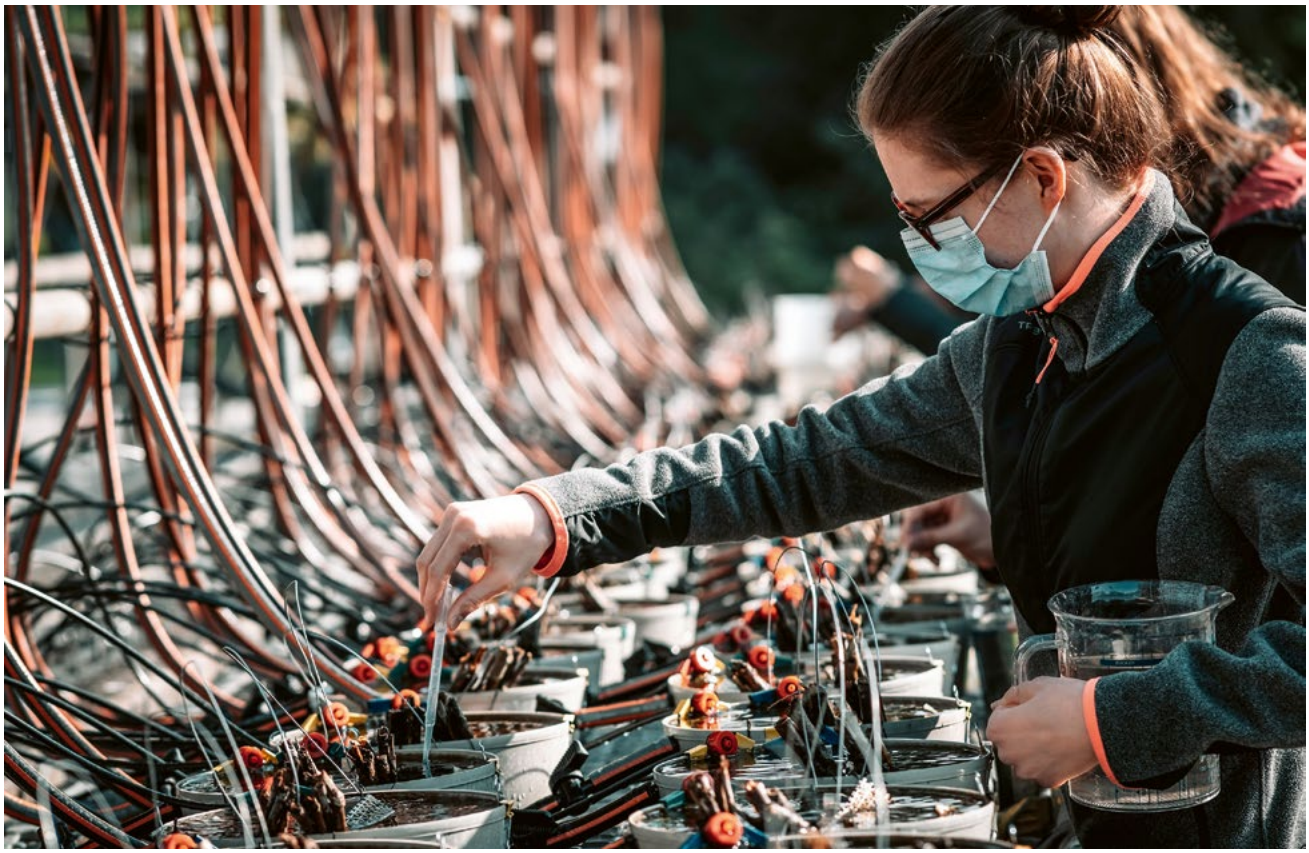
L'objectif de ce chapitre est de relier les résultats de ce troisième Green Economy Paper aux stratégies politiques dans le contexte de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie afin de faire coïncider les projets concrets avec les innovations et les approches de solutions. Les défis de la gestion de l'eau, les résultats concrets du Green Economy Paper et les principales stratégies politiques au niveau de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie sont développés ci-après sous quatre rubriques pour aboutir à des approches de solutions. Premièrement, il s'agit des fonctions de la gestion de l'eau en temps de crise climatique, deuxièmement de l'épuration des eaux usées et de l'infrastructure hydraulique, troisièmement de la coopération avec des partenaires internationaux et quatrièmement de l'excellence numérique dans la gestion de l'eau.

5.1 Fonctions liées à la gestion de l'eau en période de crise climatique

Positionnement technologique de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie en matière de résilience climatique

Les événements dramatiques et lourds de conséquences des inondations de l'Ahr et de l'Erft, tout comme dans le Sauerland, ont montré que la protection contre les inondations doit être une priorité dans le cadre de l'avancée du changement climatique. Cette constatation va dans le sens de l'analyse des stratégies politiques centrales telles que la stratégie nationale de l'eau en Allemagne et les points clés de la stratégie d'avenir de l'eau en Rhénanie-du-Nord-Westphalie. Dans ce contexte, il est réjouissant de constater que l'analyse de ce document a montré que la recherche et l'économie mettent en valeur des potentiels innovants, notamment à l'interface des prévisions météorologiques extrêmes et de l'intelligence artificielle qui peuvent aider à promouvoir la protection contre les inondations. La Rhénanie-du-Nord-Westphalie a donc toutes les chances d'emprunter de nouvelles voies, éventuellement plus efficaces, dans le domaine de la modernisation des infrastructures. Pour ce faire, il est possible de créer des espaces pour les innovations et les approches innovantes dans les appels d'offres du Land, afin de développer les approches existantes et de promouvoir de nouveaux développements. De plus, le mot-clé « Reallabore»/laboratoires réels » (voir stratégie d'adaptation au climat de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie) pourrait créer l'espace de conception nécessaire permettant de mettre en œuvre des solutions innovantes par le biais de

* La stratégie d'adaptation au changement climatique de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie comprend 110 mesures visant à protéger la santé humaine, l'environnement et l'infrastructure ainsi qu'à améliorer la qualité de vie. La gestion de l'eau fait partie intégrante de l'ensemble des mesures, par exemple le plan de travail en 10 points « Protection contre les inondations en période de changement climatique » est nommé et sa mise en œuvre est réglementée de manière contraignante, tout comme le développement d'une gestion des risques pour les crues soudaines en milieu urbain.



Le domaine de recherche spécial RESIST (Dégradation et régénération des écosystèmes fluviaux soumis à des pressions multiples), auquel participe l'université de Duisburg-Essen, se concentre notamment sur l'analyse des cours d'eau asséchés, un facteur de pollution de plus en plus fréquent en période de changement climatique.

modifications temporaires des procédures. Dans le meilleur des cas, il en résultera même des exemples de bonnes pratiques qui feront de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie un pionnier de la résilience climatique et poseront la première pierre de la coopération avec des partenaires internationaux qui souhaitent en savoir plus sur les applications en Rhénanie-du-Nord-Westphalie.

Dans le domaine de l'adaptation au changement climatique en particulier, les stratégies politiques ne sont pas les seules à montrer que de nombreux projets sont déjà en cours de réalisation. L'exemple pratique de Resilience Expo – le salon international de l'économie de l'adaptation au changement climatique en Rhénanie-du-Nord-Westphalie – permet également de montrer une approche ambitieuse à dimension internationale de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie. Le projet de Resilience Expo dans le bassin minier rhénan a pour objectif de positionner la Rhénanie-du-Nord-Westphalie comme acteur principal dans la mise à disposition de technologies d'adaptation au changement climatique. Ceci est également important pour le domaine de la gestion de l'eau, car une partie significative des technologies d'adaptation au changement climatique est développée pour le domaine de l'eau. Le concept de Resilience Expo implique une intégration ciblée d'acteurs et d'exposants internationaux afin de garantir le rayonnement suprarégional de Resilience Expo. Ainsi, Resilience Expo sera connue au-delà des frontières du bassin rhénan et créera des synergies précieuses avec des développements internationaux dans le domaine de l'adaptation au changement climatique. Resilience Expo peut également jouer un rôle important dans la conception et la mise en place de l'Exposition internationale du bâtiment et de la technologie (IBTA) dans le bassin rhénan.

Infrastructures vertes et bleues, écologie de l'eau et biodiversité

Comme le souligne ce document, le défi d'une utilisation des sols compatible avec l'eau et le climat en ville et à la campagne sera particulièrement important à l'avenir. Le Land de Rhénanie-du-Nord-Westphalie est déjà actif dans ce domaine en promouvant les infrastructures vertes et bleues. La promotion des infrastructures vertes et bleues se concentre sur l'intégration des espaces verts (tels que les parcs, les jardins et les toits végétalisés) et des plans d'eau (tels que les rivières, les lacs et les systèmes d'eau de pluie) dans les environnements urbains. Ces infrastructures jouent un rôle prépondérant dans l'amélioration de la qualité de vie dans les villes en offrant des avantages environnementaux, sociaux et économiques. Le concept moderne des Solutions basées sur la Nature (Nature-based Solutions/NBS) est important ici car il met l'accent sur les mesures qui utilisent les processus naturels pour non seulement préserver mais aussi valoriser les

écosystèmes. La mise en œuvre des NBS en tant que lien vers une infrastructure verte et bleue proche de la nature nécessite une planification minutieuse et une coopération entre les différents acteurs afin de garantir leur efficacité et leur durabilité. Il convient de poursuivre la promotion des projets correspondants et de développer l'intégration de solutions innovantes.

Outre les fonctions urbaines, l'écologie aquatique et la biodiversité doivent être prises en compte en termes de planification et, dans certains cas, de technologie. Ces mesures s'inscrivent dans une approche globale visant à gérer durablement les ressources en eau tout en favorisant la biodiversité. Outre la renaturation des eaux par le rétablissement de cours d'eau et de zones alluviales proches de l'état naturel, la protection des zones humides en tant que point fort de la biodiversité compte parmi les tâches importantes.

5.2 Traitement des eaux usées et infrastructures hydrauliques

Renforcement de la position de leader technologique dans le traitement des eaux usées

Outre les tendances générales de la recherche et les thèmes d'innovation globaux en rapport avec la gestion de l'eau, l'analyse a permis d'identifier un thème dans lequel le paysage de la recherche de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie est particulièrement bien représenté : la technologie des membranes. En Rhénanie-du-Nord-Westphalie, on constate déjà un développement important dans le domaine de la technologie membranaire pour la purification de l'eau qui permet de filtrer à un niveau croissant des polluants plus complexes. Le paysage de la recherche et des entreprises en Rhénanie-du-Nord-Westphalie apporte ainsi une contribution immense à l'un des principaux défis de la gestion de l'eau dans le monde : la pollution croissante des eaux. En outre, les entreprises et la recherche dans le domaine des membranes font partie de la mégatendance mondiale des technologies de traitement de l'eau et placent ainsi la Rhénanie-du-Nord-Westphalie à la pointe de la technologie des eaux usées.

Pour que la Rhénanie-du-Nord-Westphalie puisse s'assurer durablement cette place de leader dans le traitement des eaux usées, le développement et la mise en œuvre de nouvelles technologies sont nécessaires pour relever les défis actuels et futurs dans le domaine de l'évacuation des eaux usées. Les champs d'innovation présentés au chapitre 3.2 offrent des suggestions à cet égard. En outre, il est tout aussi important de promouvoir et de soutenir la mise en œuvre de solutions techniques par le biais de stratégies politiques. C'est ce qui se passe par exemple dans le cadre du document de référence sur la stratégie d'avenir de l'eau du Land de Rhénanie-du-Nord-Westphalie dans lequel il est prévu de promouvoir la mise en œuvre de technologies modernes de traitement des eaux usées.

Les infrastructures de l'eau, colonne vertébrale des besoins essentiels de l'économie et de la société

Assurer une infrastructure de l'eau fiable pour les générations futures est une tâche centrale de la gestion de l'eau. Contrairement à de nombreux autres secteurs de la société, ces infrastructures, une fois mises en service, sont gérées pendant plusieurs décennies. C'est pourquoi il est nécessaire de moderniser l'infrastructure une fois qu'elle est raccordée et de l'adapter à des conditions dynamiques et changeantes, comme le changement climatique. Sans cela, les installations existantes risquent de ne plus pouvoir remplir leurs fonctions. Les approches innovantes issues de la recherche et du développement doivent être mises en œuvre de manière cohérente.
Les mesures de modernisation de l'infrastructure hydraulique peuvent par exemple comprendre l'extension des systèmes d'eau ainsi que l'élimination et le traitement des eaux usées (voir la section « Renforcement de la position de leader technologique dans le traitement des eaux usées »). Mais l'accent est également mis sur un approvisionnement en eau durable et fiable. Il s'agit par exemple de redéfinir et de réévaluer les fonctions des barrages en Rhénanie-du-Nord-Westphalie dans le contexte du changement climatique. Il convient ici d'accorder un rôle particulier aux innovations issues de la mégatendance de la numérisation. Pour réévaluer les fonctions des barrages en Rhénanie-du-Nord-Westphalie, par exemple, il est possible d'utiliser des technologies numériques qui fournissent des informations sur la charge potentielle de l'eau en cas d'événements météorologiques extrêmes tels que de fortes pluies ou des inondations. Sur cette base, il est possible d'identifier les ajustements éventuellement nécessaires au niveau de la capacité et des points faibles et de développer des mesures préventives.

Considérée comme une infrastructure, l'importance de la ressource que constitue l'eau et de la gestion des eaux pour de nombreux secteurs économiques ne peut guère être surestimée. La navigation fluviale, par exemple, fournit une prestation logistique importante qui n'est possible que grâce à une infrastructure hydraulique appropriée. L'utilisation efficace de l'eau dans l'économie de production – traditionnellement pour l'énergie hydraulique et de plus en plus pour la production d'hydrogène dans les électrolyseurs ainsi que la mise en œuvre de mesures visant à réduire la consommation d'eau (efficacité hydrique) – revêt également une grande importance économique dans le site industriel de Rhénanie-du-Nord-Westphalie. Dans le contexte de la mégatendance de la recherche sur les technologies d'efficacité hydrique, la Rhénanie-du-Nord-Westphalie offre ici un important champ d'application de la recherche moderne qui peut profiter de la coopération internationale. Il convient d'identifier et d'exploiter de telles interfaces.

5.3 Promouvoir la coopération en Rhénanie-du-Nord-Westphalie ainsi qu'avec des partenaires internationaux

La gestion de l'eau en Rhénanie-du-Nord-Westphalie peut tirer profit de la coopération avec des acteurs internationaux.

La Rhénanie-du-Nord-Westphalie dispose d'un secteur de l'eau très bien implanté. Les grandes agences de l'eau marquent le secteur de leur empreinte tout comme les acteurs renommés de la recherche, les grandes et moyennes entreprises et les start-ups innovantes. Néanmoins, les résultats de ce document montrent que certains acteurs internationaux ont une longueur d'avance sur la Rhénanie-du-Nord-Westphalie dans certains domaines de recherche importants. Cela concerne également des champs thématiques avec un Future Score élevé qui pourraient, dans les prochaines années, marquer de manière décisive le développement de la gestion de l'eau. Il convient de souligner ici la Chine, les États-Unis et l'Inde, mais aussi l'Australie.

Outre ces poids lourds, d'autres pays partenaires de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie sont également très bien placés par rapport à leur taille. Il s'agit par exemple des Pays-Bas, du Danemark et de la France. En fonction des défis à relever, la gestion de l'eau en Rhénanie-du-Nord-Westphalie peut profiter d'une mise en réseau thématique avec les autres pays. Cela peut comprendre le développement (ultérieur) commun de thèmes de recherche, l'institutionnalisation d'un échange sur des thèmes innovants de la gestion de l'eau au niveau politique, la promotion de la coopération entre entreprises et la mise en place ou la pérennisation de coopérations au niveau international.

Parmi les points forts, on peut citer l'étroite coopération avec la Belgique, les Pays-Bas et la Suisse, comme voisins européens, dans les systèmes hydrographiques de Ruhr, Meuse et Rhin. Il convient d'intensifier les concertations, de développer des mesures de gestion et des approches de protection communes et d'harmoniser les approches technologiques car il est bien connu que l'eau ne connaît pas de frontières. Dans le contexte des problèmes mondiaux liés à l'eau, le Conseil consultatif scientifique du gouvernement fédéral allemand pour le changement global au niveau environnemental (WBGU) plaide pour une refonte de la gouvernance internationale de l'eau, la création d'une stratégie internationale de l'eau et la mise en place d'une initiative de cartographie de l'eau composée d'un comité d'experts et d'une plateforme scientifique. Ainsi, les situations d'urgence régionales en matière d'eau doivent être reconnues à temps et les prochaines conférences des Nations unies sur l'eau en≈2026 et 2028 doivent être informées par ce nouvel organe.[104] Le paysage scientifique de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie peut également contribuer à la mise à disposition d'une expertise technique, et les autorités locales chargées de la gestion de l'eau peuvent profiter des connaissances acquises dans le cadre de ces comités.

Les dialogues avec les acteurs centraux de la gestion de l'eau en Rhénanie-du-Nord-Westphalie fournissent des impulsions importantes pour la stratégie d'avenir prévue pour l'eau en Rhénanie-du-Nord-Westphalie.

La mise en réseau au niveau international n'est pas la seule chose qui vaille la peine. Aujourd'hui déjà, un grand nombre d'acteurs de la recherche, d'agences et d'entreprises de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie accomplissent un travail important. C'est particulièrement pertinent dans la perspective de la stratégie d'avenir de l'eau prévue pour le Land de Rhénanie-du-Nord-Westphalie. Cela vaut la peine de rechercher l'échange avec les acteurs centraux de la gestion de l'eau en Rhénanie-du-Nord-Westphalie sur les points essentiels et les défis afin d'exploiter les effets de synergie possibles entre la politique, l'administration et l'économie. Ainsi, il existe déjà aujourd'hui une série de solutions innovantes et prêtes à être commercialisées en Rhénanie-du-Nord-Westphalie dans le domaine de la protection contre les inondations.

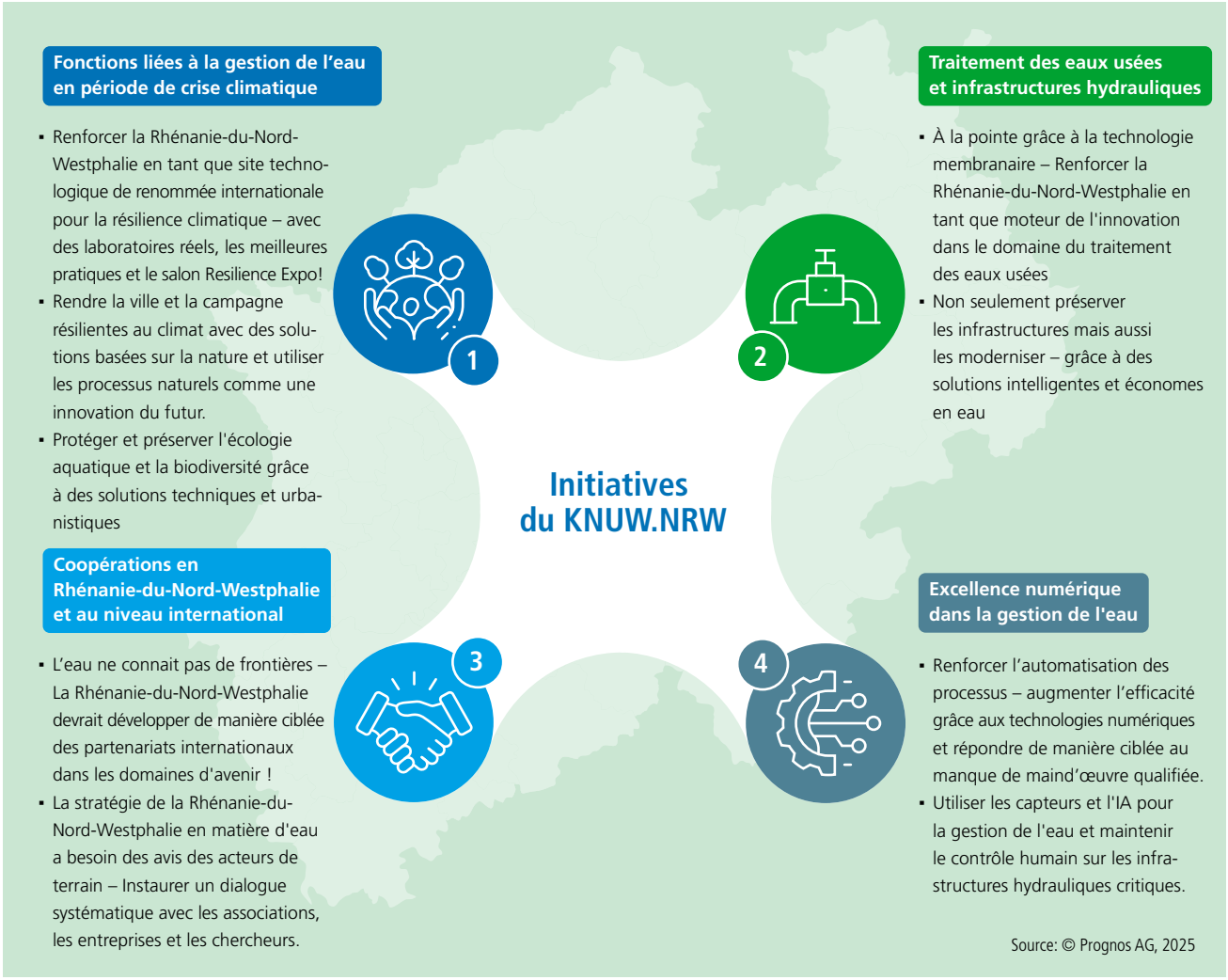
Un échange dans le cadre de séries de dialogues entre les acteurs économiques d'une part, et les agences et la politique d'autre part, pourrait ici fournir des connaissances importantes pour la stratégie d'avenir. En outre, il est également envisageable de lancer de nouveaux programmes de soutien qui, à leur tour, soutiendraient activement le développement et l'ajustement des solutions proposées par la Rhénanie du Nord-Westphalie.

5.4 Excellence numérique dans la gestion de l'eau

La numérisation : un bouleversement disruptif à fort potentiel pour la gestion de l'eau

Les résultats des présentes études le montrent : la numérisation doit être considérée comme une grande opportunité pour le secteur traditionnel de l'eau et doit être exploitée. Ce n'est pas pour rien que les technologies numériques sont identifiées comme une mégatendance absolue dans la recherche mondiale et qu'elles détermineront l'évolution des prochaines années. Même si l'entrée et la transition vers et dans les technologies numériques représentent un grand bouleversement, peut-être même disruptif, elles offrent de nombreux avantages. Les technologies numériques entraînent une plus grande automatisation et augmentent ainsi l'efficacité des processus, ce qui est particulièrement important en période de pénurie de main-d'œuvre qualifiée. En outre, les instruments numériques tels que les capteurs et l'IA permettent d'obtenir et d'évaluer une grande quantité de données qui n'étaient pas disponibles auparavant ou qui ne l'étaient que par le biais de mesures compliquées. Il convient toutefois de mettre en œuvre les mesures avec prudence et de ne pas renoncer au contrôle et à la prise

Graphique 13 : initiatives du KNUW. NRW



Source: © Prognos AG, 2025

de décision par l'homme – en particulier dans un domaine d'infrastructure critique comme l'approvisionnement en eau. C'est pourquoi il est recommandé de décider et de suivre les prochaines étapes de développement en étroite collaboration avec les acteurs de la gestion de l'eau dans le cadre d'un dialogue. La Rhénanie-du-Nord-Westphalie peut déjà s'appuyer sur un acteur fort, le Centre de compétence pour la gestion numérique de l'eau (KDW), qui, à l'initiative du Land de Rhénanie du Nord-Westphalie et en collaboration avec des entreprises leaders de ce domaine, se consacre à la numérisation et à la cybersécurité dans la gestion de l'eau.

Dans l'ensemble, il apparaît clairement que la gestion de l'eau est certes confrontée à des défis dans de nombreux domaines, mais qu'en même temps, de plus en plus d'ébauches de solutions voient le jour dans la recherche qui peuvent être utilisées pour un avenir prospère dans la gestion de l'eau. Bien entendu, certaines innovations font l'objet de recherches plus poussées que d'autres et certaines innovations sont même déjà en cours de réalisation. Mais dans l'ensemble, ce chapitre montre qu'outre les innovations, c'est surtout le transfert dans la pratique qui est important : Les innovations doivent être considérées et utilisées comme des solutions. Dans les années à venir, il sera de plus en plus important d'intégrer les approches innovantes dans la pratique. Ce n'est qu'alors qu'elles pourront contribuer à rendre notre eau plus propre, notre écosystème plus vivant, notre infrastructure plus adaptée au climat, la pénurie d'eau plus gérable et l'approvisionnement des villes et des campagnes plus efficace et plus fiable. Du point de vue du KNUW.NRW les sous-chapitres 5.1 to 5.4 conduisent aux recommandations d'action suivantes figurant dans le graphique 13.

6 Invitation au dialogue : analyse des résultats

Dans le cadre de la présente étude, il est apparu clairement que la ressource en eau est soumise à une pression croissante dans le contexte de la crise climatique, des évolutions démographiques mondiales et des conséquences qui en découlent, telles que l'augmentation des pénuries d'eau et l'accroissement des pollutions.

La mise en évidence des principaux défis liés à l'eau a montré qu'il était urgent d'agir ! Il reste cinq ans à la communauté internationale pour atteindre l'Objectif de développement durable 6 – Eau propre et assainissement des Nations unies. La stratégie européenne annoncée pour un approvisionnement en eau résilient, la stratégie nationale pour l'eau du gouvernement fédéral et la stratégie d'avenir pour l'eau du Land de Rhénanie-du-Nord-Westphalie sont autant d'expressions politiques de l'urgence d'agir.

Dans le cadre du présent document sur l'économie verte (Green Economy Paper), il est apparu clairement que les innovations peuvent contribuer de manière décisive à relever ces défis. Aujourd'hui déjà, on trouve en Rhénanie-du-Nord-Westphalie des contributions significatives à la recherche sur des approches innovantes permettant de relever les grands défis de la gestion de l'eau. Il convient de souligner les contributions de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie dans la recherche sur les membranes ainsi que dans d'autres technologies de traitement de l'eau, comme la dégradation des antibiotiques et des microplastiques. D'autre part, la Rhénanie-du-Nord-Westphalie fait preuve d'une grande activité de recherche dans le domaine de la prévision des crues et des inondations basée sur l'IA pour la protection des infrastructures critiques et dans les zones urbaines, et fournit ainsi une contribution significative à la protection contre les inondations. En outre, l'analyse des données basée sur l'IA a permis d'identifier quatre mégatendances générales à l'échelle mondiale qui continueront à marquer de manière décisive la gestion de l'eau dans les années à venir : (1.) les technologies de numérisation, (2.) les technologies de traitement de l'eau, (3.) les technologies d'efficacité de l'eau et (4.) une évolution technologique vers la durabilité.

Le présent Green Economy Paper fournit la base du contenu du processus de dialogue à plusieurs niveaux du réseau de compétences en économie de l'environnement de Rhénanie-du-Nord-Westphalie. Au cours du premier semestre 2025, une série d'interviews sera menée avec des experts de la gestion de l'eau de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie et des pays partenaires de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie, le Danemark et les Pays-Bas. L'objectif est de discuter des résultats de ce document et de les enrichir de perspectives internationales. En outre, il s'agit d'identifier les meilleures pratiques entrepreneuriales de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie et des pays partenaires et de les rendre visibles dans le cadre d'une campagne de communication subséquente – et d'en savoir plus sur des approches innovantes au-delà de nos frontières. Au troisième trimestre 2025, le KNUW prévoit en outre un atelier international avec des acteurs de la gestion de l'eau afin d'approfondir l'échange sur les innovations pertinentes en matière de gestion de l'eau, d'apprendre les uns des autres et d'initier des coopérations plus poussées. Les principaux résultats de la série de dialogues doivent en outre être mis à la disposition du ministère de l'Environnement, de la Protection de la Nature et des Transports du Land de Rhénanie-du-Nord-Westphalie (MUNV) et fournir ainsi une impulsion du point de vue de l'économie de l'environnement pour la poursuite de l'élaboration de la stratégie d'avenir pour l'eau.

Pour rester au courant de la série de dialogues, il vaut la peine de jeter un coup d'œil sur le site web ou sur le canal LinkedIn du KNUW. Connectez-vous à l'un des plus grands réseaux de l'économie environnementale en Allemagne ! Vous pouvez vous inscrire ici à notre newsletter: www.knuw.nrw/aktuelles/newsletter.html

Liste des notes finales

1 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), „Nationale Wasserstrategie – Kabinettsbeschluss vom 15. März 2023“, 2023, [en ligne]. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewaesser/BMUV_Wasserstrategie_bf.pdf (dernière vérification : 14.10.2024).

2 WWF, „High Cost of Cheap Water – The True Value of Water and Freshwater Ecosystems to People and Planet“, 2024. [en ligne]. https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/S%C3%BC%C3%9Fwasser/wwf-report-high-cost-of-cheap-water.pdf (dernière vérification : 26.02.2025).

3 Umweltbundesamt, „Wassernutzung privater Haushalte“, 2022. [en ligne]. https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/wassernutzung-privater-haushalte#direkte-und-indirekte-wassernutzung (dernière vérification : 03.06.2024).

4 World Economic Forum, „Why water security is our most urgent challenge today“, 2023. [en ligne]. https://www.weforum.org/stories/2023/10/why-water-security-is-our-most-urgent-challenge-today/ (dernière vérification : 26.02.2025).

5 BR, „Dürren in Süditalien: Auswärtiges Amt warnt Reisende“, 2024. [en ligne]. https://www.br.de/nachrichten/deutschland-welt/duerre-in-sueditalien-auswaertiges-amt-warnt-reisende (dernière vérification : 26.02.2025); UTOPIA.de, „Spanien: Katalonien ruft Wassernotstand aus und verhängt Regeln“, 2024. [en ligne]. https://utopia.de/news/spanien-katalonien-ruft-wassernotstand-aus-und-verhaengt-regeln_643774/ (dernière vérification : 26.02.2025).

6 Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr NRW (MUNV), „Umweltwirtschaftsbericht 2024“, 2024. [en ligne]. https://www.umwelt.nrw.de/themen/umwelt/umweltwirtschaft-nordrhein-westfalen/umweltwirtschaftsbericht-nrw (dernière vérification : 26.2.2025).

7 Statista, „Prognose zur Entwicklung der Weltbevölkerung von 1950 bis 2100 (in Mrd.)“, 2025. [en ligne]. https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1717/umfrage/prognose-zur-entwicklung-der-weltbevoelkerung/ (dernière vérification : 26.02.2025).

8 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), „Nationale Wasserstrategie“, 2023. [en ligne]. https://www.bmuv.de/download/nationale-wasserstrategie-2023 (dernière vérification : 26.02.2025).

9 UN, „Ensure Availability and Sustainable Management of Water and Sanitation for all“, 2022. [en ligne]. UN (2022), https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/goal-06/ (dernière vérification : 26.02.2025).

10 Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), „Wasser in einer aufgeheizten Welt“, 2024. [en ligne]. https://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/hauptgutachten/hg2024/pdf/wbgu_hg2024_zf.pdf (dernière vérification : 26.02.2025).

11 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), „Nationale Wasserstrategie – Kabinettsbeschluss vom 15. März 2023“, 2023, [en ligne]. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewaesser/BMUV_Wasserstrategie_bf.pdf (dernière vérification : 14.10.2025).

12 Umweltbundesamt, „Monitoringbericht 2023 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel“, 2023. [en ligne]. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/das-monitoringbericht_2023_bf_korr.pdf (dernière vérification : 14.10.2025).

13 Frauholz, J., Roth, H., Wessling, M., „Seawater desalination by forward-osmosis-assisted temperature swing solvent extraction“, 2023. Desalination, 564, 116697.

14 Foo, Z. H., Stetson, C., Dach, E., Deshmukh, A., Lee, H., Menon, A. K., Prasher, R., Yip, N. Y., Lienhard, J. H., Wilson, A. D. „Solvent-driven aqueous separations for hypersaline brine concentration and resource recovery“, 2022. Trends in Chemistry, 4(12), 1078–1093.

15 Elsner, C., „Ozeane – die neue Quelle für Trinkwasser“, 2023. [en ligne]. https://www.zdf.de/nachrichten/wissen/meer-wasser-entsalzung-trinkwasser-100.html (dernière vérification : 21.02.2025).

16 Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB, „Elektrodialyse“. [en ligne]. https://www.igb.fraunhofer.de/de/forschung/wasser-abwasser/entsalzung/elektrodialyse.html (dernière vérification : 21.02.2025).

17 Kabir, M. M., Sabur, G. M., Akter, M. M., Nam, S. Y., Im, K. S., Tijing, L., Shon, H. K., „Electrodialysis desalination, resource and energy recovery from water industries for a circular economy“, 2023. Desalination, 569, 117041.

18 Yu, H., Jin, H., Qiu, M., Liang, Y., Sun, P., Cheng, C., Wu, P., Wang, Y., Wu, X., Chu, D., Zheng, M., Qiu, T., Lu, Y., Zhang, B., Mai, W., Yang, X., Owens, G., Xu, H., „Making Interfacial Solar Evaporation of Seawater Faster than Fresh Water“, 2024. Advanced Materials.

19 Ren, J., Xu, J., Tian, S., Shi, K., Gu, T., Zhao, J., Li, X., Zhou, Z., Tijing, L., Shon, H. K., „Hydrodynamic solar-driven interfacial evaporation – Gone with the flow“, 2024. Water Research, 266, 122432.

20 Alrowais, R., Yousef, R. S., Ahmed, O. K., Mahmoud-Aly, M., Daiem, M. M. A., Said, N., „Enhanced detoxification methods for the safe reuse of treated olive mill wastewater in irrigation“, 2023. Environmental Sciences Europe, 35(1).

21 Heinrich-Böll-Stiftung, „Wasseratlas – Daten und Fakten über die Grundlage allen Lebens", 2025, [en ligne]. https://www.boell.de/sites/default/files/2025-01/wasseratlas-2025.pdf (dernière vérification : 23.01.2025).

22 Du Plessis, A., „Persistent degradation: Global water quality challenges and required actions", 2022. One Earth, 5(2), 129-131. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332222000434

23 Heinrich-Böll-Stiftung, „Wasseratlas – Daten und Fakten über die Grundlage allen Lebens", 2025, [en ligne]. https://www.boell.de/sites/default/files/2025-01/wasseratlas-2025.pdf (dernière vérification : 23.01.2025).

24 WDR, „Deshalb geht es Seen und Flüssen in NRW immer noch nicht gut", 2024. [en ligne]. https://www1.wdr.de/nachrichten/fluesse-seen-qualitaet-nrw-100.html (dernière vérification : 26.02.2025).

25 Verbraucherzentrale, „Ewigkeits-Chemikalien PFAS: Wo sie stecken, warum sie problematisch sind", 2024. [en ligne]. https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/umwelt-haushalt/produkte/ewigkeitschemikalien-pfas-wo-sie-stecken-warum-sie-problematisch-sind-81811 (dernière vérification : 26.02.2025).

26 Umweltbundesamt, „Arzneimittelrückstände in der Umwelt", 2023. [en ligne]. https://www.umweltbundesamt.de/daten/chemikalien/arzneimittelrueckstaende-in-der-umwelt (dernière vérification : 26.02.2025); Deutsches Ärzteblatt, „Arzneimittelrückstände im Wasser: Vermeidung und Elimination", 2018. [en ligne]. https://www.aerzteblatt.de/archiv/arzneimittelrueckstaende-im-wasser-vermeidung-und-elimination-4e3c53e5-df77-4da8-8404-96be085ee7f7 (dernière vérification : 26.02.2025).

27 NDR, „Medikamentenrückstände im Wasser: Eine Gefahr?", 2020. [en ligne]. https://www.ndr.de/ratgeber/verbraucher/Medikamentenrueckstaende-im-Wasser-Eine-Gefahr,wasser710.html (dernière vérification : 26.02.2025).

28 Umweltbundesamt, „Vorkommen multiresistenter Bakterien in der aquatischen Umwelt", 2021. [en ligne]. https://www.bfr.bund.de/cm/343/vorkommen-multiresistenter-bakterien-in-der-aquatischen-umwelt.pdf (dernière vérification : 26.02.2025).

29 Robert-Koch-Institut, „Antibiotikaresistenz – Antworten auf häufig gestellte Fragen zu Krankenhausinfektionen und Antibiotikaresistenz", https://www.rki.de/SharedDocs/FAQs/DE/Krankenhausinfektionen-und-Antibiotikaresistenz/FAQ_Liste.html (dernière vérification : 27.02.2025).

30 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), „Nationale Wasserstrategie – Kabinettsbeschluss vom 15. März 2023", 2023, [en ligne]. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewaesser/BMUV_Wasserstrategie_bf.pdf (dernière vérification : 14.10.2025).

31 Du Plessis, A., „Persistent degradation: Global water quality challenges and required actions", 2022. One Earth, 5(2), 129-131. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332222000434

32 Umweltbundesamt, „Phosphonate in Wasch- und Reinigungsmitteln und deren Verbleib in der Umwelt – Entwicklung von Analyseverfahren und deren praktische Anwendung bei Proben von Oberflächenwasser, Abwasser und Sediment", 2021. [en ligne]. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/phosphonate-in-wasch-reinigungsmitteln-deren (dernière vérification : 26.02.2025).

33 Marks, R. G. H.., Drees, F., Rockel, S., Kerpen, K., Jochmann, M. A., Schmidt, T. C., „Mechanistic investigation of phosphonate photolysis in aqueous solution by simultaneous LC-IRMS and HRMS analysis", 2023. Journal of Photochemistry and Photobiology, 439, 114582. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1010603023000473; Liang, J., Bai, Y., Hu, C., Qu, J., „Cooperative Mn(II) oxidation between two bacterial strains in an aquatic environment", 2016. Water Research, 89, 252–260; Zhu, S., Khan, M. A., Wang, F., Bano, Z., Xia, M., „Exploration of adsorption mechanism of 2-phosphonobutane-1,2,4-tricarboxylic acid onto kaolinite and montmorillonite via batch experiment and theoretical studies", 2021. Journal of Hazardous Materials, 403, 123810. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389420317994; Jia, Y., Sun, S., Wang, S., Yan, X., Qian, J., Pan, B., „Phosphorus in water: A review on the speciation analysis and species specific removal strategies", 2022. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 53(4), 435–456. https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2068362

34 Wenzel, M., Fischer, B., Renner, G., Schoettl, J., Wolf, C., Schram, J., Schmidt, T. C., Tuerk, J., „Efficient and sustainable microplastics analysis for environmental samples using flotation for sample pre-treatment", 2022. Green Analytical Chemistry. 3, 100044. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772577422000428; Krauskopf, L.-M., Hemmerich, H., Dsikowitzky, L., Schwarzbauer, J., „Critical aspects on off-line pyrolysis-based quantification of microplastic in environmental samples", 2020. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 152, 104830. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237020301091; Huang, Z., Hu, B., Wang, H., „Analytical methods for microplastics in the environment: a review", 2022. Environmental Chemical Letters, 21(1), 383-401. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9521859/#:~:text=Microplastic%20pollution%20is%20a%20recently%20discovered%20threat%20to,review%20classical%20and%20advanced%20methods%20for%20microplastic%20analysis

35 Wang, Q., Lin, W., Chou, S., Dai, P., Huang, X., „Patterned membranes for improving hydrodynamic properties and mitigating membrane fouling in water treatment: A review", 2023. Water Research, 236, 119943. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135423003792

36 Denizer, D., ElSherbiny, I. M. A., Ulbricht, M., Panglisch, S., „Studying Fluid Characteristics Atop Surface Patterned Membranes via Particle Image Velocimetry", 2021. Chemie Ingenieur Technik, 93(9). https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cite.202100043?msockid=0048257bba4b66e629243104bbe167eb

37 Emonds, S., Roth, H., Wessling, M., „Chemistry in a spinneret – Formation of hollow fiber membranes with a cross-linked polyelectrolyte separation layer", 2020. Journal of Membrane Science, 612, 118325. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0376738820309030; Kamp, J., Emonds, S., Borowec, J., Restrepo Toro, M. A., Wessling, M., „On the organic solvent free preparation of ultrafiltration and

nanofiltration membranes using polyelectrolyte complexation in an all aqueous phase inversion process", 2021. Journal of Membrane Science, 618, 118632. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0376738820312084; Zelner, M., Stolov, M., Tendler, T., Jahn, P., Ulbricht, M., Freger, V., „Elucidating ion transport mechanism in polyelectrolyte-complex membranes", 2022. Journal of Membrane Science, 658, 120757. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0376738822005026; Te Brinke, E., Achterhuis, I., Reurink, D. M., de Grooth, J., de Vos W. M., „Multiple Approaches to the Buildup of Asymmetric Polyelectrolyte Multilayer Membranes for Efficient Water Purification", 2020. ACS Applied Polymere Materials, 2(2), 7155-724. https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsapm.9b01038

38 Choi, S., Sim, W., Jang, D., Yoon, Y., Ryu, J., Oh, J., Woo, J.-S., Kim, Y. M., Lee, Y., „Antibiotics in coastal aquaculture waters: Occurrence and elimination efficiency in oxidative water treatment processes", 2020. Journal of Hazardous Materials, 396, 122585. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389420305744; Lu, Z., Ling, Y., Sun, W., Liu, C., Mao, T., Ao, X., Huang, T., „Antibiotics degradation by UV/chlor(am)line advanced oxidation processes: A comprehensive review", 2022. Environmental Pollution. 308, 119673. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749122008879

39 Xia, Z., Zhao, Y., Darling, S. B., „Covalent Organic Frameworks for Water Treatment", 2020. Advanced Materials Interfaces, 8(1), 2001507. https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/admi.202001507

40 Rasouli, S., Rezaei, N., Hamedi, H., Zendehboudi, S., Duan, X., „Superhydrophobic and superoleophilic membranes for oil-water separation application: A comprehensive review", 2021. Materials & Design, 204, 109599. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127521001520

41 Fraunhofer-Institut für Grenzflächen und Bioverfahrenstechnik IGB, „Advanced Oxidation Processes (AOP)", [en ligne]. https://www.igb.fraunhofer.de/de/forschung/wasser-abwasser/advanced-oxidation-processes-aop.html (dernière vérification : 26.02.2025).

42 Priyadarshini, M., Das, I., Ghangrekar, M. M., Blaney, L., „Advanced oxidation processes: Performance, advantages, and scale-up of emerging technologies", 2022. Journal of Environmental Management, 316, 115295. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479722008684

43 Rat der Europäischen Union, „Ein EU-Gesetz zu kritischen Rohstoffen für die Zukunft der EU-Lieferketten", [en ligne]. https://www.consilium.europa.eu/de/infographics/critical-raw-materials/ (dernière vérification : 23.01.2025).

44 Helmholtz-Zentrum Dresden – Rossendorf e.V., „Heute Umweltlast, morgen Rohstoffquelle", 2019. [en ligne]. https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=57744&pLang=de&pNid=no (dernière vérification : 23.01.2025).

45 European Environment Agency, „Wasser- und Meeresumwelt", 2020, [en ligne]. https://www.eea.europa.eu/de/themes/water/intro (dernière vérification : 06.02.2024).

46 European Union, „Water Framework Directive", 2024, [en ligne]. https://water.europa.eu/freshwater/europe-freshwater/water-framework-directive (dernière vérification : 06.02.2024).

47 Umweltbundesamt, „Wasserwirtschaft in Deutschland – Grundlagen, Belastungen, Maßnahmen", 2017. [en ligne]. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba_wasserwirtschaft_in_deutschland_2017_web_aktualisiert.pdf (dernière vérification : 09.10.2024).

48 Umweltbundesamt, „Wasserwirtschaft in Deutschland – Grundlagen, Belastungen, Maßnahmen", 2017. [en ligne]. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba_wasserwirtschaft_in_deutschland_2017_web_aktualisiert.pdf (dernière vérification : 09.10.2024).

49 Landesregierung Nordrhein-Westfalen, „Zukunftsstrategie Wasser: Wasserressourcen nachhaltig und klimastabil sichern", 2024, [en ligne]. https://www.land.nrw/pressemitteilung/zukunftsstrategie-wasser-wasserressourcen-nachhaltig-und-klimastabil-sichern (dernière vérification : 06.02.2024).

50 Heinrich-Böll-Stiftung, „Wasseratlas – Daten und Fakten über die Grundlage allen Lebens", 2025, [en ligne]. https://www.boell.de/sites/default/files/2025-01/wasseratlas-2025.pdf (dernière vérification : 23.01.2025).

51 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), „Nationale Wasserstrategie – Kabinettsbeschluss vom 15. März 2023", 2023, [en ligne]. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewaesser/BMUV_Wasserstrategie_bf.pdf (dernière vérification : 14.10.2025).

52 Löhmann, B., „Biotenside: Nachhaltig waschen und reinigen", 2021. [en ligne]. https://biooekonomie.de/themen/dossiers/biotenside-nachhaltig-waschen-und-reinigen (dernière vérification : 21.02.2025).

53 Silva, I. A., Fortunato, J. G. L. A., Almeida, F. C. G., Alves, R. N., Cunha, M. C. C., Rufino, R. D., Fernandes, M. L. B., Sarubbo, L. A., „Production and Application of a New Biosurfactant for Solubilisation and Mobilisation of Residual Oil from Sand and Seawater", 2024. Processes, 12(8), 1605.

54 Da Silva Faccioli, Y. E., De Oliveira, K. W., Campos-Guerra, J. M., Converti, A., De Cássia F. Soares Da Silva, R., Sarubbo, L. A., „Biosurfactants: Chemical Properties, Ecofriendly Environmental Applications, and Uses in the Industrial Energy Sector", 2024. Energies, 17(20), 5042.

55 Guo, M., Song, W., Tian, J., „Biochar-Facilitated Soil Remediation: Mechanisms and Efficacy Variations", 2020. Frontiers in Environmental Science, 8.

56 Sun, Y., Xiong, X., He, M., Xu, Z., Hou, Z., Zhang, W., Ok, Y.S., Rinklebe, J., Wang, L., Tsang, D., „Roles of biochar-derived dissolved organic matter in soil amendment and environmental remediation: A critical review", 2021. Chemical Engineering Journal, 424.

57 Yang, H., Kong, J., Hu, H., Du, Y., Gao, M., Chen, F. „A Review of Remote Sensing for Water Quality Retrieval: Progress and Challenges", 2022. Remote Sensing, 14, 1770.

58 Chen, J., Chen, S., Fu, R., Li, D., Jiang, H., Wang, C., Peng, Y., Jia, K., Hicks, B. J., „Remote Sensing Big Data for Water Environment Monitoring: Current Status, Challenges, and Future Prospects", 2022. Earth S Future, 10(2).

59 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), „Nationale Wasserstrategie – Kabinettsbeschluss vom 15. März 2023", 2023, [en ligne]. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewaesser/BMUV_Wasserstrategie_bf.pdf (dernière vérification : 14.10.2025).

60 Umweltbundesamt, „WASKlim – Wasserwirtschaftliche Anpassungsstrategien an den Klimawandel", 2015. [en ligne]. https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/projektkatalog/wasklim-wasserwirtschaftliche-anpassungsstrategien (dernière vérification : 26.02.2025).

61 Tagesschau.de, „So ist die Lage in den Überschwemmungsgebieten", 2024. [en ligne]. https://www.tagesschau.de/ausland/europa/hochwasser-oesterreich-tschechien-polen-deutschland-104.html (dernière vérification : 26.02.2025).

62 ZDFheute, „Spanien: Mindestens 95 Tote nach Unwettern", 2024. [en ligne]. https://www.zdf.de/nachrichten/panorama/spanien-unwetter-andalusien-valencia-zug-100.html (dernière vérification : 26.02.2025).

63 Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung (WIFO), „Hochwasser verursachte 1,3 Mrd. Euro Schaden", 2024. [en ligne]. https://www.wifo.ac.at/news/hochwasser-verursachte-13-mrd-e-schaden (dernière vérification : 28.02.2025).

64 Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr NRW (MUNV), „Umweltwirtschaftsbericht 2024", 2024. [en ligne]. https://www.umwelt.nrw.de/themen/umwelt/umweltwirtschaft-nordrhein-westfalen/umweltwirtschaftsbericht-nrw (dernière vérification : 26.02.2025).

65 Zhu, H., Leandro, J., Lin, Q., „Optimization of Artificial Neural Network (ANN) for Maximum Flood Inundation Forecasts", 2021. Water, 13(16), 2252. https://www.mdpi.com/2073-4441/13/16/2252/review_report; Hofmann, J., Schüttrumpf, H., „floodGAN: Using Deep Adversarial Learning to Predict Pluvial Flooding in Real Time", 2021. Water, 13(16), 2255. https://www.mdpi.com/2073-4441/13/16/2255; Kumar, V., Azamathulla, H. M., Sharma, K. V., Mehta, D. J., Maharaj, K. T., „The State of the Art in Deep Learning Applications, Challenges, and Future Prospects: A Comprehensive Review of Flood Forecasting and Management", 2023. Sustainability, 15(13), 10543. https://www.mdpi.com/2071-1050/15/13/10543; Miau, S., Hung W.-H., „River Flooding Forecasting and Anomaly Detection Based on Deep Learning", 2020. IEEE Access, 8, 198384-198402. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9245480

66 Chen, W., Wang, X., Tong, D., Cai, Z., Zhu, Y., Lius, C., „Dynamic early-warning model of dam deformation based on deep learning and fusion of spatiotemporal features", 2021. Knowledge-Based Systems, 233, 107537. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950705121007991; Hariri-Ardebilit, M. A., Mahdavi, G., Nuss, L. K., Lall, U., „The role of artificial intelligence and digital technologies in dam engineering: Narrative review and outlook", 2023. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 126(A), 106813. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0952197623009971

67 Romero-Ben, L., Alves, D., Blesa, J., Cembrano, G., Puig, V., Duviella, E., „Leak detection and localization in water distribution networks: Review and perspective", 2023. Annual Reviews in Control, 55, 392-419. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578823000160

68 Mashhadi, N., Shahrour, I., Attoue, N., El Khattabi, J., Aljer, A., „Use of Machine Learning for Leak Detection and Localization in Water Distribution Systems", 2021. Smart Cities, 4(4), 1293-1315. https://www.mdpi.com/2624-6511/4/4/69; Vrachimis, S. G., Timotheou, S., Eliades, D. G., Polycarou, M. M., „Leakage detection and localization in water distribution systems: A model invalidation approach", 2021. Control Engineering Practice, 110, 104755.

69 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), „Nationale Wasserstrategie – Kabinettsbeschluss vom 15. März 2023", 2023, [en ligne]. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewaesser/BMUV_Wasserstrategie_bf.pdf (dernière vérification : 14.10.2025).

70 Statista, „Entwicklung der weltweiten Agrarfläche und der weltweiten Waldfläche in den Jahren 1990 bis 2022", 2022. [en ligne]. https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1176219/umfrage/agrarflaechen-und-der-waldflaechen-weltweit/ (dernière vérification : 26.02.2025).

71 BUND Landesverband NRW, „Landwirtschaft", 2025. [en ligne]. https://www.bund-nrw.de/themen/landwirtschaft/ (dernière vérification : 26.02.2025).

72 Heinrich-Böll-Stiftung, „Wasseratlas – Daten und Fakten über die Grundlage allen Lebens", 2025, [en ligne]. https://www.boell.de/sites/default/files/2025-01/wasseratlas-2025.pdf (dernière vérification : 23.01.2025).

73 Heinrich-Böll-Stiftung, „Wasseratlas – Daten und Fakten über die Grundlage allen Lebens", 2025, [en ligne]. https://www.boell.de/sites/default/files/2025-01/wasseratlas-2025.pdf (dernière vérification : 23.01.2025).

74 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), „Nationale Wasserstrategie – Kabinettsbeschluss vom 15. März 2023“, 2023, [en ligne]. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewaesser/BMUV_Wasserstrategie_bf.pdf (dernière vérification : 14.10.2025).

75 Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ), „Nachhaltige Stadtentwicklung“, 2024, [en ligne]. https://www.bmz.de/de/themen/stadtentwicklung (dernière vérification : 27.02.2025).

76 Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), „Wasser in einer aufgeheizten Welt“, 2024. [en ligne]. https://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/hauptgutachten/hg2024/pdf/wbgu_hg2024_zf.pdf (dernière vérification : 26.02.2025).

77 Phys.org, „Rapid urbanization increasing pressure on rural water supplies globally“, 2019. [en ligne]. https://phys.org/news/2019-04-rapid-urbanization-pressure-rural-globally.html (dernière vérification : 26.02.2025).

78 Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), „Wasser: N“, 2021. [en ligne]. https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/DE/7/31660_Wasser_N.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (dernière vérification : 26.02.2025); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), „Nationale Wasserstrategie – Kabinettsbeschluss vom 15. März 2023“, 2023, [en ligne]. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewaesser/BMUV_Wasserstrategie_bf.pdf (dernière vérification : 14.10.2025).

79 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), „Nationale Wasserstrategie – Kabinettsbeschluss vom 15. März 2023“, 2023, [en ligne]. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewaesser/BMUV_Wasserstrategie_bf.pdf (dernière vérification : 14.10.2025).

80 Hofmann, J., Schüttrumpf, H., „floodGAN: Using Deep Adversarial Learning to Predict Pluvial Flooding in Real Time“, 2021. Water, 13(16), 2255. https://www.mdpi.com/2073-4441/13/16/2255

81 Yu, Z., Zhang, H., Huang, J., Li, S., Zhang, S., Cheng, Y., Mao, J., Dong, X., Gao, S., Wang, S., Chen, Z., Jiang, Y., Lai, Y., „Namib desert beetle inspired special patterned fabric with programmable and gradient wettability for efficient fog harvesting“, 2021. Journal of Materials Science & Technology. 61, 85-92. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1005030220305879; Wang, X., Zeng, J., Li, J., Yu, X., Wang, Z., Zhang, Y., „Beetle and cactus-inspired surface endows continuous and directional droplet jumping for efficient water harvesting“, 2021. Journal of Materials Chemistry, A(3). https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/ta/d0ta10123k

82 Ebers, N., Stupak, N., Hüttel, S., Woelfert, M., Müller-Thomy, H., „Potenzialabschätzung von technischen Wasserspeicheroptionen, Bewässerungsansätzen und ihrer Umsetzbarkeit“, 2023. Thünen Working Paper 227. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn067235.pdf

83 Cai, Y., Wu, P., Zhu, D., Zhang, L., Zhao, X., Gao, X., Ge, M., Song, X., Wu, Y., Dai, Z., „Subsurface irrigation with ceramic emitters: An effective method to improve apple yield and irrigation water use efficiency in the semiarid Loess Plateau“, 2021. Agriculture, Ecosystems & Environment. 313, 107404. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880921001080

84 Zhang, W., Sheng, J., Li, Z., Weindorf, D. C., Hu, G., Xuan, J., Zhao, H., „Integrating rainwater harvesting and drip irrigation for water use efficiency improvements in apple orchards of northwest China“, 2021. Scientia Horticulturae, 275, 109728. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423820305562

85 Lius, X., Peng, Y., Yang, Q., Wang, X., Cui, N., „Determining optimal deficit irrigation and fertilization to increase mango yield, quality, and WUE in a dry hot environment based on TOPSIS“, 2021. Agricultural Water Management. 245, 106650. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377420321946

86 Mokari, E., Samani, Z., Heerema, R., Dehghan-Niri, E., DuBois, D., Ward, F., Pierce, C., „Development of a new UAV-thermal imaging based model for estimating pecan evapotranspiration“, 2022. Computers and Electronics in Agriculture, 194, 106752. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169922000692

87 Sailer, C., „Warum die Windeln nichts mehr von sich geben – Superabsorbierende Polymere“, [en ligne]. https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/matl/polymer-physics-dam/documents/150years/ETH_polymerphysics_opendays_5(1).pdf (dernière vérification : 26.02.2025).

88 Chang, L., Xu, L., Lius, Y., Qiu, D., „Superabsorbent polymers used for agricultural water retention“, 2021. Polymer Testing, 94, 107021. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941820322509; Kaur, P., Agrawal, R., Pfeffer, F. M., Williams, R., Bohidar, H. B., „Hydrogels in Agriculture: Prospects and Challenges“, 2023. Journal of Polymers and the Environment, 31, 3701–3718. https://link.springer.com/article/10.1007/s10924-023-02859-1

89 Oladosu, Y., Rafii, M. Y., Arolu, F., Chukwu, S. C., Salisu, M. A., Fagbohun, I. K., Muftaudeen, T. K., Swaray, S., Haliru, B. S., „Superabsorbent Polymer Hydrogels for Sustainable Agriculture: A Review“, 2022. Horticulturae, 8(7), 605. https://www.mdpi.com/2311-7524/8/7/605

90 Kugler, K., Weßling, M., Stolten, D., „Electrochemical nitrogen reduction for ammonia synthesis“, 2015. Dissertation, RWTH Aachen. [en ligne]. https://www.ecpe.rwth-aachen.de/cms/ecpe/forschung/publikationen/~eknl/details/?file=572765

91 van Langevelde, P. H., Katsounaros, I., Koper, M. T. M.: „Electrocatalytic Nitrate Reduction for Sustainable Ammonia Production“, 2021. Future Energy, 5, 12. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435120306243

92 Analytic News, „Nachhaltige Ammoniaksysthese entwickeln", 2022. [en ligne]. https://analytik.news/presse/2022/396.html (dernière vérification : 28.02.2025)

93 Kavya, M., Mathew, A., Shekar, P. R., Sarwesh, P., „Short term water demand forecast modelling using artificial intelligence for smart water management", 2023. Sustainable Cities and Society, 95, 104610. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670723002214

94 Zhang, S., Jin, Y., Chen, W., Wang, J., Wang, Y., Ren, H., „Artificial intelligence in wastewater treatment: A data-driven analysis of status and trends. 2023. Chemosphere, 336, 139163. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653523014303

95 Ismail, S., Dawoud, D. W., Ismail, N., Marsh, R., Alshami, A. S., „IoT-Based Water Management Systems: Survey and Future Research Direction", 2022. IEEE, 10. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9745489; Singh, M., Ahmed, S. „IoT based smart water management systems: A systematic review", Materialstoday: Proceedings, 2021. 46(11), 5211-5218. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785320364701

96 Xiang, H., Min, X., Tang, C., Sillanpää, M., Zhao, F., „Recent advances in membrane filtration for heavy metal removal from wastewater: A mini review", 2022. Journal of Water Process Engineering, 49, 103023. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714422004676

97 Li, B., Qi, B., Guo, Z., Wang, D., Jiao, T., „Recent developments in the application of membrane separation technology and its challenges in oil-water separation: A review", 2023. Chemosphere, 327. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653523007956

98 Mishra, S., Sundaram, B., „A review of the photocatalysis process used for wastewater treatment", 2024. Materialstoday: Proceedings, 102, 393-409. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785323040166

99 Epelle, E. I., Okoye, P. U., Roddy, S., Gunes, B., Okolie, J. A., „Advances in the Applications of Nanomaterials for Wastewater Treatment", 2022. Environments, 9(11), 141. https://www.mdpi.com/2076-3298/9/11/141

100 Romero-Ben, L., Alves, D., Blesa, J., Cembrano, G., Puig, V., Duviella, E., „Leak detection an localization in water distribution networks: Review and perspective", 2023. Annual Reviews in Control, 55, 392-419. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578823000160

101 Europäische Kommission, „Neue Technologien helfen der Prozessindustrie zu mehr Wassereffizienz". 2020. [en ligne]. https://cordis.europa.eu/article/id/421824-new-technologies-help-process-industry-become-more-water-efficient/de (dernière vérification : 26.02.2025).

102 Obaideen, K., Yousef, B. A. A., AlMallahi, M. N., Tan, Y. C., Mahmoud, M., Jaber, H., Ramadan, M., „An overview of smart irrigation systems using IoT", 2022. Energy Nexus, 7, 100124. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772427122000791; Alharbi, S., Felemban, A., Abdelrahim, A., Al-Dakhil, M., „Agricultural and Technology-Based Strategies to Improve Water-Use Efficiency in Arid and Semiarid Areas", 2024. Water, 16(13), 1842. https://www.mdpi.com/2073-4441/16/13/1842

103 Europäische Kommission, „Wassereffizienz an erster Stelle – Leitprinzipien". [Online] https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/14490-Wassereffizienz-an-erster-Stelle-Leitprinzipien_de (dernière vérification : 04.04.2025).

104 Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), „Policy Brief. Empfehlungen für die internationale Wassergovernance". [Online] https://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/policybrief/policybrief_01_2025/pdf/WBGU_Policy_Brief_01_2025_de.pdf (dernière vérification : 04.04.2025).

Mentions legales

Réseau de compétence pour l'économie de l'environnement en Rhénanie-du-Nord-Westphalie (KNUW.NRW)

Réalisé par VDI Technologiezentrum GmbH,
Prognos AG, INZIN e. V.

Site web : www.knuw.nrw
E-mail : info@knuw.nrw

Responsable
VDI Technologiezentrum GmbH
VDI-Platz 1, 40468 Düsseldorf
E-mail: vditz@vdi.de
Téléphone : +49 211 6214 401

Directeur général : Dipl.-Ing. Sascha Hermann
Amtsgericht Düsseldorf HRB 49295,
USt.-ID: DE 813846179

Pour le compte de :
Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNV)

Auteurs

Michelle Reuter
Niklas Gaus
Paulin Zahn
Marieke Eckhardt
Greta Dekker
Johanna Thierstein
Cara Blaschke
Oliver Lühr

Rédaction et conception
löwenholz kommunikation Berlin
WEBERSUPIRAN.berlin Kommunikationsgestaltung

Sources des images

Page de Couverture	IMAGO/Rupert Oberhäuser
Page 3	Land NRW/Ralph Sondermann
Page 6	Tourismus NRW e. V.
Page 8	Stadt Bochum
Page 10	Ilja Höpping/Stadt Duisburg
Page 31	WasserStiftung
Page 22	Chemische Verfahrenstechnik AVT. CVT/RWTH Aachen
Page 15	Agence spatiale européenne ESA (contient des données Copernicus Sentinel modifiées (2024), traitées par l'ESA)
Page 18	Agence spatiale européenne ESA (contient des données Copernicus Sentinel modifiées (2024), traitées par l'ESA)
Page 21	Cornelsen Umwelttechnologie GmbH
Page 26	Okeanos GmbH
Page 33	IMAGO/Cord
Page 35	Giacomo Zucca/Bundesstadt Bonn
Page 36	Gelsenwasser AG
Page 38	Neuland Hambach GmbH | VIZE renderings
Page 40	UDE/Jörg Strackbein

Düsseldorf, juin 2025

A Measure of the Green Economy Strategy

green economy

Leading in North Rhine-Westphalia

Green Economy Network NRW (KNUW.NRW)

Le reseau de competences en economie de l'environnement de Rhenanie-du-Nord-Westphalie (KNUW.NRW), financé par le ministère de l'Environnement, de la Protection de la nature et des Transports du Land de Rhénanie-du-Nord-Westphalie, soutient le développement de l'économie environnementale en Rhénanie-du-Nord-Westphalie en proposant des services dans les domaines de la mise en réseau, de l'information, de la recherche et du développement, de l'internationalisation et de la prospection de marchés. KNUW.NRW propose de nombreuses activités d'information et de mise en réseau, dont le SUMMIT Umweltwirtschaft.NRW, rendez-vous annuel de l'économie environnementale en Rhénanie-du-Nord-Westphalie. L'objectif de ces formats est d'encourager les coopérations et les mises en réseau, de promouvoir le transfert de connaissances et de technologies et de permettre ainsi de trouver des solutions à des questions touchant le marché.

Pour plus d'informations
www.knuw.nrw

Inscription à la newsletter
www.knuw.nrw/newsletter

Contact
Direction Kompetenznetzwerk Umweltwirtschaft.NRW (KNUW.NRW)
Hartmut Schug, VDI Technologiezentrum GmbH

représenté par :
Oliver Lühr, Prognos AG
Prof. Dr. Martin Faulstich, INZIN e. V.