UN WATER

unesco

Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2022

EAUX SOUTERRAINES
Rendre visible l'invisible

unesco
Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

PNUD

CEE, CEPALC, CESAO, CESAP

unesco
Programme hydrologique intergouvernemental

ONU HABITAT
POUR UN MEILLEUR AVENIR URBAIN

UNIDO

GROUPE DE LA BANQUE MONDIALE

Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2022

EAUX SOUTERRAINES
Rendre visible l'invisible

Publié en 2022 par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture,
7, Place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP, France

© UNESCO 2022

Le présent rapport est publié par l'UNESCO pour le compte d'ONU-Eau. La liste des membres et des partenaires d'ONU-Eau est disponible à l'adresse suivante : www.unwater.org.

ISBN 978-92-3-200252-5

Cette publication est disponible en libre accès en vertu de la licence Attribution-ShareAlike 3.0 IGO (CC-BY-SA 3.0 IGO) (creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/deed.fr). En utilisant le contenu de ce rapport, les utilisateurs acceptent d'être contraints par les modalités d'utilisation des publications en libre accès de l'UNESCO (fr.unesco.org/open-access/terms-use-ccbysa-fr).

La présente licence s'applique exclusivement aux textes contenus dans cette publication. L'utilisation de contenus n'étant pas clairement identifiés comme appartenant à l'UNESCO devra faire l'objet d'une demande préalable auprès du titulaire du droit d'auteur.

Les désignations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent, de la part de l'UNESCO, aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites. De même, les frontières et les noms indiqués et les désignations employées sur les cartes n'impliquent pas reconnaissance ou acceptation officielle par l'Organisation des Nations Unies.

Les idées et opinions exprimées dans cette publication sont celles des auteurs ; elles ne reflètent pas nécessairement les points de vue de l'UNESCO et n'engagent en aucune façon l'Organisation. Les membres et partenaires d'ONU-Eau ainsi que d'autres listés sur les pages de titre des chapitres du présent rapport ont réalisé ses contenus. L'UNESCO et le Programme mondial de l'UNESCO pour l'évaluation des ressources en eau (WWAP) ne sont pas responsables des erreurs présentes dans les contenus fournis ou des contradictions dans les données et contenus entre les différents chapitres de ce rapport. Le WWAP a offert la possibilité aux individus d'être listés comme auteurs et contributeurs ainsi que d'être reconnus dans cette publication. Le WWAP n'est responsable d'aucune omission à cet égard.

Chapitre 4 et section 8.1 contiennent des extraits de documents du Service géologique britannique @ UKRI 2022

Section 8.2 : Annukka Lipponen, Sonja Koeppel et Sarah Tiefenauer-Linardon © 2022 Nations Unies

Chapitre 12 : Annukka Lipponen, Sonja Koeppel et Sarah Tiefenauer-Linardon © 2022 Nations Unies

Chapitre 13 : Financer la durabilité © Banque internationale pour la reconstruction et le développement/Banque mondiale. Cette traduction n'a pas été réalisée par la Banque mondiale et ne doit pas être considérée comme une traduction officielle de la Banque mondiale. La Banque mondiale ne peut être tenue responsable du contenu de cette traduction ou des erreurs qui s'y trouveraient.

Titre original :

The United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater: Making the invisible visible

Citation suggérée :

Organisation des Nations Unies, *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2022 : Eaux souterraines : rendre visible l'invisible*. UNESCO, Paris.

Couverture originale de Davide Bonazzi.

Traduit par International Translation Agency Ltd (ITA)

Conception graphique et mise en page par Marco Tonsini

Imprimé par l'UNESCO, Paris

Imprimé en France

Cette publication est imprimée sur du papier 100 % recyclé, sans chlore.

Climatiquement neutre
Production
ClimatePartner.com/12066-2002-1001

RÉSUMÉ

L'immense potentiel des eaux souterraines et la nécessité de les gérer de façon durable ne peuvent plus désormais être ignorés

Les eaux souterraines, qui constituent près de 99 % de toutes les réserves d'eau douce liquide sur Terre, peuvent apporter aux sociétés d'immenses opportunités et bénéfices sur le plan social, économique et environnemental. Les eaux souterraines fournissent déjà la moitié de la quantité d'eau prélevée pour un usage domestique par la population mondiale, y compris l'eau potable fournie à une grande majorité de la population rurale, qui n'est pas desservie par des systèmes de distribution publics ou privés, et environ 25 % de toute l'eau prélevée à des fins d'irrigation. Pourtant, cette ressource naturelle reste mal comprise et, par conséquent, est sous-évaluée, mal gérée, voire gaspillée.

Les eaux souterraines constituent près de **99%** de toutes les réserves d'eau douce liquide sur Terre

Les eaux souterraines jouent un rôle central dans la lutte contre la pauvreté, la sécurité alimentaire et hydrique, la création d'emplois décents, le développement socio-économique, et la résilience des sociétés et des économies au changement climatique. Or, notre dépendance à l'égard des eaux souterraines ne peut que s'accroître, en raison surtout d'une demande croissante en eau de tous les secteurs, conjuguée à la variation de plus en plus marquée des régimes pluviométriques.

Le rapport décrit les défis et les opportunités que présentent l'exploitation, la gestion et la gouvernance des eaux souterraines dans le monde. Il vise à apporter une compréhension claire du rôle que les eaux souterraines joue dans notre vie quotidienne, de leurs interactions avec les populations et des possibilités d'optimisation de leur emploi afin de garantir la viabilité à long terme de cette ressource largement abondante mais non moins vulnérable.

Il faudra consentir des efforts importants et concertés pour assurer une gestion et une utilisation durables des eaux souterraines en vue de tirer parti de tout leur potentiel. Pour y parvenir, commençons par rendre visible l'invisible.

unesco

UN WATER

"Les guerres prenant naissance dans l'esprit des hommes et des femmes, c'est dans l'esprit des hommes et des femmes que doivent être élevées les défenses de la paix"

Table des matières

Avant-propos par Audrey Azoulay, *Directrice générale de l'UNESCO* viii

Avant-propos par Gilbert F. Houngbo, *Président d'ONU-Eau et Président du FIDA*.... ix

Préface x

Équipe de production du WWDR 2022 xii

Remerciements..... xiii

Résumé..... 1

Prologue : L'état des ressources en eaux souterraines **13**

La quantité d'eau douce 14

Le renouvellement des ressources en eau douce 15

Prélèvements d'eau douce, stress hydrique et pénuries d'eau.....17

Les ressources en eaux souterraines et leur répartition géographique.....18

Prélèvements et utilisations des eaux souterraines.....20

Contraintes naturelles propres aux zones d'extraction des eaux souterraines.....23

Chapitre 1 : Introduction **25**

1.1 Objectif et périmètre du présent rapport.....26

1.2 Propriétés uniques et caractéristiques des eaux souterraines et de leurs systèmes..27

1.3 Les aquifères : principales caractéristiques et ressources en eaux souterraines 28

1.4 Petit historique de l'exploitation des eaux souterraines 31

1.5 Quels services offrent les eaux souterraines aux humains et aux écosystèmes ?.....32

1.6 Interconnexions mondiales.....33

1.7 Les eaux souterraines dans le contexte des programmes et accords mondiaux.....34

1.8 Les défis liés aux eaux souterraines 36

1.9 Les possibilités d'accroître les bénéfices fournis par les eaux souterraines 39

Chapitre 2 : Aspects juridiques et institutionnels de la gouvernance des eaux souterraines **41**

2.1 Gouvernance et gestion des eaux souterraines 42

2.2 Instruments juridiques.....44

2.3 Aspects institutionnels.....47

Chapitre 3 : Eaux souterraines et agriculture..... **49**

3.1 Introduction.....50

3.2 Utilisation des eaux souterraines dans le secteur agricole 50

3.3 Impacts de l'agriculture sur le volume des eaux souterraines 54

3.4 Les terres agricoles disposant de nappes phréatiques 58

3.5 Impacts de l'agriculture sur la qualité des eaux souterraines 58

3.6 Liens entre les eaux souterraines et l'énergie dans l'irrigation.....61

Table des matières

Chapitre 4 : Les eaux souterraines pour les établissements humains 63
4.1 Introduction 64
4.2 L'approvisionnement en eau en zones urbaines 66
4.3 L'approvisionnement en eau en zones rurales 72
4.4 Préoccupations environnementales 74
4.5 Le rôle des parties prenantes 77
4.6 En conclusion 77

Chapitre 5 : Eaux souterraines et industrie 79
5.1 Contexte 80
5.2 L'extraction et l'emploi des eaux souterraines dans l'industrie 80
5.3 Industrie, qualité des eaux souterraines et pollution 85
5.4 Exploitation minière et eaux souterraines 87
5.5 Énergie, production électrique et eaux souterraines 89
5.6 Industrie et responsabilité dans la gestion des eaux souterraines 93
5.7 Aller de l'avant 95

Chapitre 6 : Les eaux souterraines et les écosystèmes 96
6.1 Introduction aux écosystèmes dépendant des eaux souterraines 97
6.2 Omniprésence des écosystèmes dépendant des eaux souterraines 100
6.3 Les services écosystémiques des eaux souterraines et les menaces pesant sur eux 103
6.4 Gestion conjointe de l'eau et des terres, solutions fondées sur la nature et protection des écosystèmes 106

Chapitre 7 : Eaux souterraines, aquifères et changement climatique 110
7.1 Introduction 111
7.2 Impacts du changement climatique sur les ressources en eaux souterraines 111
7.3 Résilience et vulnérabilité des systèmes aquifères au changement climatique 118
7.4 Adaptations au changement climatique basées sur les eaux souterraines par l'intervention humaine 120
7.5 Atténuation du changement climatique par les eaux souterraines grâce à l'énergie géothermique à faible teneur en carbone 122
7.6 Atténuation du changement climatique grâce au captage et au stockage du carbone 125

Chapitre 8 : Perspectives régionales sur les eaux souterraines 126
8.1 Afrique subsaharienne 127
8.2 Europe et Amérique du Nord 133
8.3 Amérique latine et Caraïbes 141
8.4 Asie et Pacifique 146
8.5 Région arabe 152

Chapitre 9 : Renforcer et actualiser les bases de connaissances 158
9.1 Introduction 159
9.2 Étude des nappes souterraines : caractérisation et évaluation 159
9.3 Surveillance des nappes souterraines 163
9.4 Analyse prédictive et incertitude des prévisions 167
9.5 Partage des connaissances et renforcement des capacités 168

Table des matières

Chapitre 10 : Politiques et planification relatives aux eaux souterraines 172
10.1 Les politiques relatives aux eaux souterraines.....173
10.2 Exemples de politiques relatives aux eaux souterraines.....176
10.3 Planification de la gestion des eaux souterraines.....176
10.4 Exemples de planification de la gestion des eaux souterraines.....180

Chapitre 11 : Gestion des eaux souterraines 182
11.1 Introduction.....183
11.2 Exigences en matière de données et de connaissances.....183
11.3 Le contrôle des extractions.....183
11.4 Protection de la qualité des nappes souterraines.....186
11.5 Méthodes de gestion intégrée.....187
11.6 Conclusions 189

Chapitre 12 : Aquifères transfrontaliers 191
12.1 Introduction.....192
12.2 État actuel des connaissances sur les aquifères transfrontaliers 192
12.3 Les défis propres aux aquifères transfrontaliers.....193
12.4 Aspects juridiques et institutionnels internationaux.....196
12.5 Coopération sur les aquifères transfrontaliers.....196
12.6 Avantages de la coopération transfrontière 198

Chapitre 13 : Le financement au service de la durabilité 200
13.1 Financements disponibles et financements requis 201
13.2 Établir des sources de financement permanentes, structurelles et adéquates 202
13.3 Utiliser les financements actuellement disponibles à bon escient.....202

Chapitre 14 : Conclusions..... 207
14.1 Perspectives et défis.....208
14.2 Aller de l'avant.....210
14.3 Coda 214

Références..... 215

Acronymes..... 249

Encadrés, figures et tableaux

Encadrés

Encadré 1.1 Les systèmes d'eaux souterraines ... 27
Encadré 1.2 Qu'est-ce qu'un aquifère ? ... 28
Encadré 2.1 Définir la gouvernance des eaux souterraines ... 42
Encadré 2.2 Définir la gestion des eaux souterraines ... 45
Encadré 2.3 Passer de droits d'extraction de l'eau « basés sur le volume » à des droits d'extraction « par attribution de parts » en Nouvelle-Galles du Sud (Australie) ... 46
Encadré 3.1 Épuisement des eaux souterraines en Égypte ... 56
Encadré 3.2 Quand les terres agricoles irriguées par eaux de surface disposent d'une nappe phréatique : l'exemple du Pakistan ... 57
Encadré 3.3 Énergie et irrigation en Afrique subsaharienne ... 60
Encadré 3.4 Eaux souterraines et énergie en Inde ... 62
Encadré 4.1 Exemple de gestion réussie de l'extraction d'eaux souterraines en milieu urbain à Hambourg (Allemagne) ... 66
Encadré 4.2 Un projet d'utilisation combinée des eaux vise à préserver un aquifère d'importance vitale à Lima ... 69
Encadré 4.3 Les eaux souterraines aident à lutter contre de graves crises d'approvisionnement en eau à Madras (Inde) ... 70
Encadré 4.4 Au Bangladesh, un puits profond permet de fournir de l'eau potable aux réfugiés rohingyas ... 72
Encadré 4.5 La forte dépendance de Lusaka envers les eaux souterraines comporte des risques importants ... 75
Encadré 5.1 Avantages de la surveillance de la qualité des eaux souterraines : le cas d'AngloGold Ashanti au sein de Cerro Vanguardia S.A. (Argentine) ... 89
Encadré 5.2 Les décharges de cendres de charbon : l'héritage de la pollution des nappes souterraines ... 93
Encadré 5.3 Un partenariat entre PT Multi Bintang et l'ONUDI ... 94
Encadré 6.1 Cartographie des écosystèmes dépendant des eaux souterraines en Californie (États-Unis) ... 99
Encadré 6.2 Les nappes souterraines, les zones humides d'importance internationale (sites Ramsar) et les sites désignés par l'UNESCO tels les sites du patrimoine mondial, les réserves de biosphère et les géoparcs ... 107
Encadré 6.3 Des solutions fondées sur la nature pour protéger les écosystèmes dépendant des eaux souterraines ... 108
Encadré 7.1 Stratégie de gestion de la recharge des aquifères (MAR) ... 121
Encadré 8.1 La crise d'approvisionnement en eau dans la ville du Cap ... 132
Encadré 8.2 Le programme de Gestion de la recharge des aquifères (MAR) de Windhoek ... 132
Encadré 8.3 État quantitatif et état chimique des masses d'eaux souterraines au sein de l'Union européenne ... 136
Encadré 8.4 La transition difficile entre l'évaluation hydrogéologique et la prise en compte du stress hydrique humain ... 137
Encadré 8.5 L'accord relatif à l'aquifère Guarani (GAA) ... 145
Encadré 8.6 Contrats de gestion des aquifères au Maroc ... 157
Encadré 8.7 Application de la MAR à Abou Dhabi ... 157
Encadré 10.1 Déroulement concret du processus de planification relatif aux aquifères prioritaires ... 177
Encadré 11.1 Gestion des extractions d'eaux souterraines : la délivrance de permis et l' « accroissement des puits » pour réduire les impacts (bassin de la rivière South Platte, Colorado, États-Unis) ... 186
Encadré 11.2 Zones de protection des sources d'eaux souterraines ... 188
Encadré 11.3 Collecte des eaux pluviales pour le stockage et la récupération dans les aquifères : exemple d'un projet de MAR dans la région d'Adélaïde (Australie) ... 190
Encadré 12.1 Initiative sur la gestion des ressources des aquifères transnationaux ... 193
Encadré 12.2 Protection et utilisation du Système aquifère karstique dinaric transfrontalier (DIKTAS) ... 197
Encadré 12.3 Le Mécanisme de coopération multipays pour la gouvernance de l'aquifère de Stampriet, premier mécanisme coopératif pour les aquifères transfrontaliers au sein d'un organisme de bassins fluviaux ... 198
Encadré 12.4 La coopération dans le bassin aquifère sénégalo-mauritanien, une étape vers la promotion de la paix et la résilience entre les États ... 199
Encadré 13.1 Combiner droits d'exploitation et tarifs d'utilisation en vue d'optimiser la gestion, la surveillance et l'extraction des ressources en eaux souterraines au Pérou ... 204
Encadré 13.2 Combiner un financement mixte et les technologies émergentes pour fournir de l'eau potable à des villages ruraux en Tanzanie ... 205
Encadré 13.3 Paiement de services écosystémiques par des fonds du secteur privé : le cas de la ville de Kumamoto au Japon ... 206

Figures

Figure 1 Estimation des volumes d'eau douce liquide présents sur les différents continents ... 15
Figure 2 Estimation du renouvellement des ressources en eau douce sur les différents continents, 2015 ... 16
Figure 3 Prélèvements d'eau douce en 2017, ventilés par continent et par secteur d'utilisation (en km³/an) ... 17
Figure 4 Moyenne annuelle des indices mensuels de pénurie en eau bleue avec une résolution de 30x30 minutes d'arc, 1996-2005 ... 19
Figure 5 Nombre de mois par an au cours desquels l'indice de pénurie en eau bleue dépasse 1,0, 1996-2005 ... 19
Figure 6 Ressources en eaux souterraines dans le monde ... 20
Figure 7 Carte mondiale des zones connues d'eaux douces et d'eaux saumâtres souterraines offshore ... 21
Figure 8 Zones d'eaux souterraines vulnérables à l'intrusion d'eau de mer et à l'élévation du niveau de la mer ... 23
Figure 9 Zones à risque touchées par l'affaissement des sols causé par l'extraction d'eaux souterraines dans le monde ... 24
Figure 1.1 Coupe verticale représentant les aquifères, les couches imperméables et la zone non saturée ... 29
Figure 1.2 Évolution des extractions totales d'eaux souterraines dans plusieurs pays, 1950-2020 ... 32
Figure 1.3 Les nombreux services offerts par les systèmes d'eaux souterraines ... 33
Figure 1.4 Les objectifs de développement durable ... 35
Figure 1.5 Distribution régionale et mondiale des services d'eau potable, 2015-2020 (%) ... 36
Figure 2.1 Principaux éléments de gouvernance et de gestion des eaux souterraines : des principes politiques aux méthodes de mise en œuvre ... 43
Figure 3.1 Estimations des extractions totales d'eau souterraine et du pourcentage utilisé pour l'irrigation dans certains pays en 2010 ... 52
Figure 3.2 Baisse du niveau des nappes souterraines dans certains des principaux aquifères du monde ... 55
Figure 4.1 Aperçu schématique des sources d'approvisionnement en eau en zones urbaines, de leur utilisation et de leurs interactions ... 67
Figure 4.2 Évolution typique de l'approvisionnement en eau des zones urbaines ... 68
Figure 5.1 Prélèvements d'eau effectués par l'industrie de façon autonome aux États-Unis ... 81
Figure 5.2 Utilisation de l'eau au cours du cycle de vie d'un projet minier ... 88
Figure 5.3 Sources et utilisations de l'eau douce aux États-Unis, 2015 ... 90
Figure 5.4 Énergie utilisée pour divers procédés dans le secteur de l'eau ... 92
Figure 5.5 Inducteurs de valeur pour la gérance de l'eau au sein des entreprises et des communautés ... 95
Figure 6.1 Exemple d'écosystème dépendant des eaux souterraines : vue aérienne des plaines inondables et des îles du delta de l'Okavango ... 97
Figure 6.2 Interactions entre eaux souterraines, écosystèmes, activités humaines et solutions fondées sur la nature ... 98
Figure 6.3 Répartition mondiale de la dépendance à l'égard des eaux souterraines, zones de menaces régionales et priorités pour la conservation et la gestion des écosystèmes aquatiques et terrestres ... 102
Figure 6.4 Relations entre les différents types d'écosystèmes dépendant des eaux souterraines et les services écosystémiques qu'ils fournissent ... 103
Figure 6.5 Impacts écologiques de la diminution de qualité et de quantité des nappes souterraines ... 105
Figure 7.1 Principales interactions entre les eaux souterraines et le changement climatique : les impacts directs et indirects du changement climatique affectent les systèmes d'eaux souterraines ... 112
Figure 7.2 Projections de l'évolution des précipitations annuelles moyennes à l'échelle mondiale du fait du changement climatique ... 113
Figure 7.3 Évolution du stockage mensuel des eaux souterraines et des précipitations annuelles dans quatre grands systèmes aquifères des zones arides des États-Unis et de l'Australie ... 115
Figure 7.4 Impact de l'élévation du niveau de la mer (SLR) sur l'intrusion d'eau de mer dans un système aquifère côtier non confiné en pente ... 117
Figure 7.5 Diagramme schématique montrant différents types de systèmes d'énergie géothermique, à savoir le stockage d'énergie thermique en aquifères (ATES), la pompe à chaleur géothermique (GSHP) et le système géothermique stimulé (SGS) ... 123
Figure 8.1 Résilience des nappes souterraines au changement climatique : des réserves importantes d'eaux souterraines produisent un effet tampon contre les variations, à court terme, des précipitations et une recharge moyenne élevée des nappes permet, sur le long terme, à un aquifère de se reconstituer rapidement après une sécheresse ... 129
Figure 8.2 Répartition des principaux types d'aquifères en Afrique ... 130
Figure 8.3 Prélèvements d'eaux douces souterraines, exprimés en pourcentage de la quantité totale (brute) d'eau douce prélevée dans certains pays (dernière année disponible) ... 134
Figure 8.4 Pourcentage de la superficie des nappes souterraines « en mauvais état chimique » par district hydrographique ... 140
Figure 8.5 Taux de recharge des principaux systèmes de nappes souterraines en Amérique latine et dans les Caraïbes ... 142
Figure 8.6 Ressources en eaux souterraines de l'Asie ainsi que de l'Australie et de l'Océanie ... 147
Figure 8.7 Origine des extractions d'eau souterraine par type de source dans certains États arabes ... 152
Figure 8.8 Systèmes aquifères transfrontaliers dans la région arabe ... 153

Figure 8.9 Évolution des réserves d'eaux souterraines (épaisseur équivalente en eau liquide) dans la région arabe, entre 2002 et 2019, établie à partir des données de la mission GRACE (en cm) ... 154
Figure 9.1 Exemple d'une carte hydrogéologique avec coupe transversale ... 162
Figure 9.2 Piézomètre moderne équipé d'un enregistreur de données et d'une fiche explicative pour le public (Parc national De Alde Feanen, province de Frise, Pays-Bas) ... 164
Figure 9.3 Groupe de forages pour la surveillance des niveaux de nappe à différentes profondeurs (couches de couverture, substrat rocheux peu profond et profond) sur un site à l'est de l'Irlande ... 165
Figure 9.4 Indicateur de sécheresse des nappes phréatiques aux États-Unis, sur la base d'informations issues de la mission GRACE ... 166
Figure 9.5 Différentes formes de diffusion des données et des informations sur les nappes souterraines selon les utilisateurs envisagés ... 168
Figure 9.6 Système mondial d'information sur les eaux souterraines (GGIS) ... 170
Figure 10.1 Qu'est-ce qu'une politique ? Un modèle de l'État de Nouvelle-Galles du Sud (Australie) ... 173
Figure 10.2 Structure institutionnelle pour l'élaboration des politiques relatives aux eaux souterraines ... 175
Figure 10.3 Étapes et facteurs de l'élaboration d'un plan de gestion des eaux souterraines ... 178
Figure 11.1 Sources de pollution qui menacent la qualité des nappes souterraines ... 186
Figure 12.1 Aquifères transfrontaliers dans le monde ... 192
Figure 12.2 Le pompage de l'eau souterraine à partir d'un puits dans le pays A peut avoir un impact sur la partie de l'aquifère qui se trouve dans le pays B ... 194
Figure 13.1 Valeur économique totale des eaux souterraines ... 203

Tableaux

Tableau 1 Prélèvements d'eaux souterraines en 2017 répartis selon les principales régions du monde ... 22
Tableau 2 Répartition des prélèvements d'eaux souterraines en 2017 par secteur d'utilisation et par continent ... 22
Tableau 3.1 Superficies irriguées dans chaque région et dans le monde, avec la part des eaux souterraines utilisée ... 52
Tableau 4.1 Données nationales relatives aux prélèvements d'eaux souterraines en milieu urbain ... 65
Tableau 4.2 Résumé des avantages que présentent les sources d'eaux souterraines pour les services publics de distribution d'eau ... 66
Tableau 4.3 Répartition des services d'approvisionnement en eau potable qui utilisent les eaux souterraines ... 73
Tableau 5.1 Les quinze pays étant estimés avoir extrait annuellement les plus grandes quantités d'eaux souterraines (2010) ... 81
Tableau 5.2 Les neuf pays ayant extrait annuellement les plus grandes quantités d'eau à usage industriel (en km³/an) ... 82
Tableau 5.3 Utilisation de l'eau pour le traitement des textiles aux États-Unis (en l/kg de production) ... 83
Tableau 5.4 Contaminants industriels des eaux souterraines les plus courants par source de pollution ... 85
Tableau 5.5 Impacts de l'exploitation minière actuelle et passée sur les eaux souterraines ... 88
Tableau 5.6 Apports en eau par source dans la production thermoélectrique au Canada (2017) ... 91
Tableau 8.1 Quelques caractéristiques générales de la gouvernance des eaux souterraines dans chaque sous-région du point de vue de l'intégration régionale (à titre indicatif uniquement) ... 135
Tableau 8.2 Quelques solutions en matière de gouvernance et/ou de gestion des défis liés aux eaux souterraines dans chaque sous-région (à titre indicatif) ... 140
Tableau 9.1 Paramètres fréquemment inclus dans la surveillance de la qualité des nappes souterraines ... 160
Tableau 10.1 Exemples d'actions pouvant être définies par les plans de gestion des eaux souterraines ... 179
Tableau 11.1 Méthodes de contrôle des extractions d'eaux souterraines ... 184
Tableau 12.1 Données et informations requises pour évaluer et gérer un aquifère transfrontalier ... 195
Tableau 12.2 Résumé des résultats du suivi global de l'indicateur 6.5.2, 2017 et 2020 ... 198

Avant-propos

par **Audrey Azoulay**, *Directrice générale de l'UNESCO*

Le cycle de l'eau nous apprend que l'eau est toujours en mouvement. L'eau fond, l'eau s'évapore, l'eau se condense, l'eau coule ; elle n'est jamais statique. Au cours de ce processus, l'eau s'infiltre dans les sols et s'accumule dans des nappes souterraines. Cette eau souterraine constitue une ressource naturelle précieuse, invisible mais indispensable à la vie sur notre planète.

Près de 50% de la population urbaine mondiale dépend en effet, d'une manière ou d'une autre, des sources d'eaux souterraines. De plus en plus d'aquifères sont pourtant pollués, surexploités ou asséchés – parfois de manière irréversible. Et de nombreux décideurs dans le secteur de l'eau n'ont pas toujours une vision claire de ce que sont les eaux souterraines, malgré le rôle essentiel de celles-ci dans le cycle de l'eau.

C'est pourquoi l'UNESCO et ONU-Eau ont décidé d'organiser un sommet mondial sur les eaux souterraines en décembre 2022. Cette ressource sera également mise à l'honneur lors de la Journée mondiale de l'eau, célébrée le 22 mars. Enfin, la présente édition du Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau lui est entièrement consacrée.

Ce rapport, intitulé *Eaux souterraines : rendre visible l'invisible*, permettra à chacun de prendre conscience de l'abondance, et de la fragilité de cette ressource. Il fournit des informations détaillées sur les réserves d'eau souterraine et souligne leur importance pour l'approvisionnement en eau des êtres humains comme de l'environnement.

Cette publication ne se limite cependant pas à un état des lieux des ressources actuelles : elle dresse un tableau des défis qui nous attendent. Surtout, elle envisage de nouvelles méthodes pour gérer l'eau de manière plus efficace et durable : il s'agit d'utiliser plus intelligemment les réserves d'eau souterraine, encore inégalement exploitées, et de protéger les nappes contre la pollution et la surexploitation, afin de répondre aux besoins d'une population mondiale en constante expansion et de mieux réagir aux crises climatiques et énergétiques mondiales.

Elle montre aussi que la préservation de la santé humaine, la réduction de la pauvreté et l'égalité des genres reposent en partie sur une meilleure gestion des eaux souterraines. C'est pourquoi l'accroissement des connaissances et le développement des moyens actuels ne suffisent pas ; pour protéger les aquifères, il nous faudra aussi innover en développant de nouveaux procédés techniques, en réformant nos institutions et notre droit, en nous dotant de nouveaux modes de financement, et en faisant évoluer les comportements.

Ce rapport essentiel, coordonné par l'UNESCO, n'aurait pas pu voir le jour sans le soutien constant que le Gouvernement italien et la Regione Umbria apportent au Programme mondial de l'UNESCO pour l'évaluation des ressources en eau. Je souhaiterais également remercier chaleureusement l'ensemble de la famille ONU-Eau d'avoir mis à contribution ses connaissances et ses compétences.

Les eaux souterraines seront à l'avenir une source d'opportunités, mais aussi de défis que l'UNESCO est déterminée à relever, notamment grâce à son Programme hydrologique intergouvernemental. J'espère donc que cette nouvelle édition du Rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau permettra aux décideurs d'adapter les méthodes d'exploitation, de gestion et de gouvernance aux spécificités des eaux souterraines — qu'il aidera, en un mot, à rendre visible l'invisible.

Audrey Azoulay

Avant-propos

par **Gilbert F. Houngbo**, *Président d'ONU-Eau*
et Président du Fonds international de développement agricole

Stockées sous nos pieds, à l'abri des regards, les eaux souterraines constituent une ressource à laquelle beaucoup d'entre nous ne prête guère attention. Pourtant, près de la totalité des réserves d'eau douce liquide de la planète sont souterraines, lesquelles jouent un rôle crucial pour l'approvisionnement en eau potable, les cultures agricoles, le secteur industriel et les écosystèmes.

Ainsi que le montre ce rapport, les activités humaines entraînent une surexploitation et une pollution des nappes souterraines dans de nombreux endroits ; dans d'autres, nous ignorons tout simplement quelle quantité d'eau est présente dans le sous-sol. La mauvaise gestion des eaux souterraines, et leurs trop fréquentes altérations par la pollution ou la surexploitation, compromettent l'ensemble du cycle de l'eau — et, par conséquent, menacent le bien-être humain et la survie de toutes les espèces.

La présente édition du Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau met l'accent sur la nécessité de mieux connaître et protéger cette ressource. Elle montre que la gestion équitable et durable des eaux souterraines est impérative à notre survie tout comme elle est déterminante pour nous adapter au changement climatique et satisfaire les besoins d'une population croissante.

Comme de coutume, ce rapport s'adresse aussi bien aux experts qu'à un public plus large cherchant à mieux comprendre le rôle joué par l'eau dans les sociétés humaines et le développement. Les informations, les analyses et les exemples fournis par les membres et partenaires d'ONU-Eau nous aide à comprendre de quelles multiples façons les eaux souterraines participent au maintien de la santé, de l'agriculture, de l'emploi, de l'environnement et de nombreux autres domaines.

La conclusion est sans appel : si nous voulons atteindre les objectifs de développement durable d'ici à 2030, il faut améliorer notre utilisation et notre gestion des eaux souterraines de toute urgence.

Les décideurs politiques doivent, dès à présent, tenir pleinement compte de la contribution vitale des eaux souterraines à la résilience des humains et de leurs activités face à un avenir où le climat sera de plus en plus incertain.

L'édition 2022 du Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau résulte d'une coopération entre diverses entités de l'Organisation des Nations Unies et les organisations partenaires de la famille ONU-Eau. Les contributions précieuses d'une diversité d'experts ont permis de produire une analyse claire et compréhensible des eaux souterraines tout en identifiant les défis à relever et les solutions souhaitables.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers l'UNESCO ainsi qu'envers son Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau, qui a coordonné la production de ce rapport. Je souhaiterais également remercier tous les collègues qui y ont participé.

Il est de notre devoir de protéger et d'utiliser les eaux souterraines de manière durable, en conciliant les besoins des populations et ceux de notre planète. Ce rapport permettra aux lecteurs, j'en suis convaincu, de mieux comprendre comment améliorer les politiques relatives aux eaux souterraines ; j'espère qu'il sera le déclencheur des actions dont nous avons éminemment besoin.

Gilbert F. Houngbo

Préface

par **Michela Miletto**, *Coordinatrice de l'UNESCO WWAP*
et **Richard Connor**, *Rédacteur en chef*

Chaque année, l'édition du Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau (WWDR) offre un éclairage unique sur un aspect de l'eau. Certains rapports se sont intéressés à des thèmes relativement techniques tels que l'énergie, les eaux usées, les solutions fondées sur la nature ou le changement climatique. D'autres ont traité de sujets relatifs à l'eau — le développement durable, l'emploi, l'accès universel, la valeur de l'eau — sous un angle socio-économique principalement. Dans certains cas, nous avons pu baser notre travail sur une quantité considérable de données, d'informations, d'analyses et de documents déjà existants ; dans d'autres, la limitation importante des connaissances nous a obligés à adopter une approche plus créative dans la conception et la rédaction du rapport.

Cette nouvelle édition du WWDR a cela de particulier que, pour la première fois, nous mettons en avant un élément spécifique du cycle général de l'eau — à savoir, les eaux souterraines. En d'autres termes, le sujet (ou thème) du rapport de cette année ne correspond pas juste à un angle ou à une perspective à travers lesquels appréhender le rôle de l'eau eu égard à divers buts et objectifs sociaux, économiques et environnementaux. Il concerne la ressource elle-même ; et de surcroît, une ressource d'eau douce essentielle qui est passée inaperçue depuis bien trop longtemps.

Neuvième d'une série de rapports thématiques annuels, l'édition 2022 du WWDR se propose d'explorer l'importance des eaux souterraines pour le développement durable ainsi que de mettre en lumière les politiques et les mesures de gestion devant être adoptées, non seulement pour assurer la pérennité de cette ressource mais aussi pour optimiser les nombreuses opportunités qu'elle offre, dans un monde en rapide évolution où la demande en eau ne cesse de croître et où les ressources d'eau potable sont limitées et souvent fragiles.

Comme le souligne le rapport, les eaux souterraines servent déjà, de façon essentielle, à contribuer à la sécurité alimentaire et énergétique, aux établissements urbains et (surtout) ruraux ainsi qu'à l'industrie. Elles constituent un élément indispensable au bon fonctionnement de nombreux écosystèmes et offrent des possibilités exceptionnelles de s'adapter au changement climatique et d'en atténuer les effets. Le rapport décrit également des solutions qui permettraient de surmonter les obstacles aux progrès en matière de gouvernance et de gestion des ressources en eaux souterraines, notamment en ce qui concerne la collecte et la diffusion des données, les cadres juridiques et politiques, le renforcement des capacités et le financement.

Une autre particularité de cette édition annuelle tient au nombre élevé de ses auteurs et contributeurs tout comme à la richesse de leurs propos. Jamais auparavant, nous n'avions bénéficié d'un tel soutien de la part de si nombreux experts et praticiens émérites du monde entier ; nul doute que la qualité et la pertinence du rapport en sont le reflet. La réalisation de ce rapport nous a certainement permis de créer de nouvelles amitiés — tout en renouant avec d'autres ! Nous espérons sincèrement que, dans les années à venir, nous pourrons continuer à générer un tel travail collaboratif.

Grâce à cette étroite coopération, nous avons cherché à produire un compte-rendu équilibré, factuel et objectif de l'état actuel des connaissances, en traitant des avancées les plus récentes comme en mettant en avant les difficultés et les bénéfices qu'apporterait une meilleure prise en compte des eaux souterraines. Bien qu'il soit d'abord destiné aux responsables politiques et aux décideurs, aux responsables des ressources en eau, aux universitaires ainsi qu'à l'ensemble des acteurs du développement, nous espérons que ce rapport intéressera également les non-spécialistes de même que celles et ceux qui sont engagés dans la lutte contre la pauvreté et les crises humanitaires, qui œuvrent au respect des droits humains en matière d'approvisionnement en eau et d'assainissement ainsi qu'à la réalisation du Programme de développement durable à l'horizon 2030.

Cette nouvelle édition du WWDR est le résultat d'efforts concertés entre les organismes qui ont été chargés de chacun des chapitres et dont les noms figurent dans les remerciements. Le rapport a grandement bénéficié des apports et des contributions de plusieurs autres membres et partenaires d'ONU-Eau ainsi que de nombreux instituts de recherche, universités, groupements scientifiques et ONG, qui ont fourni une diversité de contenus pertinents.

Au nom du secrétariat du WWAP, nous souhaitons exprimer notre plus profonde gratitude aux principaux organismes, membres et partenaires d'ONU-Eau, ainsi qu'aux auteurs et aux autres collaborateurs qui ont produit, ensemble, ce rapport officiel unique durant la deuxième année de la pandémie de la COVID-19 et ce en dépit des difficultés supplémentaires imposées par la situation à chacun d'entre nous. Nous remercions en particulier Jac van der Gun d'avoir partagé généreusement ses connaissances, sa perspicacité et ses conseils tout au long du processus de réalisation du présent rapport.

Nous sommes infiniment reconnaissants au Gouvernement italien de son financement du WWAP et à la Regione Umbria, de la mise à disposition de Villa La Colombella, à Pérouse, pour héberger le secrétariat du WWAP. Leur soutien a été essentiel à la production du WWDR.

Nous tenons à remercier particulièrement Audrey Azoulay, Directrice générale de l'UNESCO, qui soutient de façon indéfectible le WWAP et la réalisation du WWDR, ainsi que Gilbert F. Houngbo, Président d'ONU-Eau et Président du Fonds international de développement agricole.

Nous exprimons notre plus sincère gratitude envers nos collègues du secrétariat du WWAP, dont les noms sont mentionnés dans les remerciements. Le rapport n'aurait pas vu le jour sans leur professionnalisme et leur engagement.

Enfin, nous dédions ce rapport aux personnels de santé et aux travailleurs essentiels dont les efforts inlassables, en première ligne, nous ont permis de vivre en étant aussi protégés que possible pendant l'actuelle pandémie de la COVID-19.

Michela Miletto

Richard Connor

Équipe de production du WWDR 2022

Directrice de la publication
Michela Miletto

Rédacteur en chef
Richard Connor

Coordinateur de la publication
Engin Koncagül

Assistante de publication
Valentina Abete

Graphiste
Marco Tonsini

Éditrice (version française)
Céline Curiol

Secrétariat du Programme mondial de l'UNESCO pour l'évaluation des ressources en eau (WWAP) (2021-2022)

Coordinatrice : Michela Miletto

Programmes : Richard Connor, Laura Veronica Imburgia, Engin Koncagül et Laurens Thuy

Publications : Valentina Abete, Martina Favilli et Marco Tonsini

Communications : Simona Gallese

Administration : Barbara Bracaglia, Lucia Chiodini et Arturo Frascani

Informatique et sécurité : Michele Brensacchi, Tommaso Brugnami et Francesco Gioffredi

Membres du personnel détachés et stagiaires : Hanouf Alyami Madhi, Ahmed Asaad Quotah, Caterina Brazda, Giulia Cadoni, Hugo Chauvin, Arianna Fusi et Candelaria Landin Moreno

Remerciements

Le présent rapport est publié par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO), au nom d'ONU-Eau, et sa production est coordonnée par le Programme mondial de l'UNESCO pour l'évaluation des ressources en eau (WWAP). Nous remercions les membres et partenaires d'ONU-Eau ainsi que les autres contributeurs qui ont rendu possible l'élaboration du contenu de ce rapport.

Organismes chargés des chapitres

Ask for Water GmbH pour le compte du Réseau d'approvisionnement en eau en milieu rural (RWSN), Association internationale des hydrogéologues (AIH), Banque mondiale, Centre international d'évaluation des ressources en eaux souterraines (IGRAC), Centre régional pour la gestion des eaux souterraines pour l'Amérique latine et les Caraïbes (CeReGas), Commissions régionales des Nations Unies (Commission économique pour l'Europe — CEE, Commission économique pour l'Amérique latine et les Caraïbes — CEPALC, Commission économique et sociale pour l'Asie et le Pacifique — CESAP, Commission économique et sociale pour l'Asie occidentale — CESAO), Institut international de gestion des ressources en eau (IWMI), International Water Association (IWA), Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI), Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD), Programme des Nations Unies pour les établissements humains (ONU-Habitat), Rapporteur spécial sur les droits de l'homme à l'eau potable et à l'assainissement, et UNESCO (Programme hydrologique intergouvernemental — PHI, Bureau de l'UNESCO à Nairobi, Bureau de l'UNESCO à Montevideo et WWAP).

Contributeurs

Agence européenne pour l'environnement (AEE), Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), AIH, Ask for Water GmbH pour le compte de RWSN, Association internationale des ressources en eau (AIRE), Association internationale pour l'ingénierie et la recherche hydro-environnementale (AIRH), Association internationale des sciences hydrologiques (AISH), Association internationale du droit des eaux (AIDA), Banque mondiale, CDP (anciennement le Carbon Disclosure Project), Centre de recherche sur les ressources en eau de l'Université d'Arizona, Centre du patrimoine mondial de l'UNESCO (CPM/WHC), CEPALC, CESAO, Département de la planification, de l'industrie et de l'environnement de la Nouvelle-Galles du Sud, Département de l'eau et de l'assainissement du County de Miami-Dade (WASD), Division de la statistique de l'ONU, École de droit de l'Université A&M du Texas, Entreprise de transformation agricole TRAGSA, Environmental Law Institute (ELI), Haut-Commissariat des Nations Unies aux droits de l'homme (HCDH), IGRAC, Institut pour l'eau, l'environnement et la santé (UNU-INWEH), Institut pour l'éducation relative à l'eau (IHE-Delft), Institut pour la réduction des risques et des catastrophes du University College de Londres (UCL-IRDR), Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IDAEA-CSIC), IWMI, Kiwa Water Research Institute (KWR), Ministère américain de l'agriculture (USDA), National Centre for Groundwater Research and Training et Université de Flinders, Organisation de recherche scientifique et industrielle du Commonwealth (CSIRO) - département Terre et Eau, Organisation internationale pour les migrations (OIM), Organisation météorologique mondiale (OMM), ONUDI, Organisation pour la recherche appliquée aux Pays-Bas (TNO), Partenariat mondial pour l'eau (GWP), PNUD, Rapporteur spécial sur les droits de l'homme à l'eau potable et à l'assainissement, Service géologique britannique (BGS), The Nature Conservancy (TNC), Trinity College de Dublin, UNESCO-PHI, UNESCO-WWAP, Union internationale pour la conservation de la nature et de ses ressources (UICN), Université de Genève, Université de Kiel, Université de la Sorbonne et École des Mines de Paris, Université de Strathclyde, Université de Tsukuba, Université des Nations Unies - Institut pour la gestion intégrée des flux matériels et des ressources (UNU-FLORES), Université du Massachusetts, Université du Texas à Austin (UTexas-Austin), Université polytechnique de Catalogne, Université technique de Dresde (TU-Dresden), WaterAid et Women for Water Partnership (WfWP).

Donateurs

L'élaboration du présent rapport a reçu le soutien financier du Gouvernement italien et de la Regione Umbria.
Nous tenons à remercier tous ceux qui y ont contribué ainsi que leurs donateurs respectifs.

La présente édition du *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau* (WWDR 2022) vise à porter un éclairage sur les eaux souterraines, en attirant l'attention sur leurs rôles spécifiques ainsi que sur les défis et les opportunités qu'elles présentent dans le contexte de la mise en valeur, de la gestion et de la gouvernance des ressources en eau dans le monde.

Présentes partout sur Terre même si leur répartition y est inégale, les eaux souterraines — qui constituent près de 99 % de toutes les réserves en eau douce liquide de la planète — peuvent apporter aux sociétés d'énormes avantages sociaux, économiques et environnementaux, notamment en matière d'adaptation au changement climatique. Les eaux souterraines fournissent déjà la moitié de la quantité d'eau prélevée pour un usage domestique par la population mondiale et environ 25 % de toute l'eau prélevée à des fins d'irrigation, alimentant ainsi 38 % des terres irriguées dans le monde. Pourtant, malgré son importance capitale, cette ressource naturelle reste mal comprise et par conséquent sous-évaluée, mal gérée, voire gaspillée. Dans un contexte marqué par une pénurie croissante des ressources en eau dans de nombreuses régions du monde, il devient urgent de reconnaître l'immense potentiel des eaux souterraines et la nécessité de les gérer prudemment.

Les eaux souterraines offrent de nombreux services

La capacité des systèmes d'eaux souterraines à fournir divers services dépend de leurs caractéristiques géographiques ainsi que de l'influence dynamique qu'exercent les processus naturels et humains sur celles-ci.

Ces services comprennent :

- *L'approvisionnement* par lequel les eaux souterraines sont prélevées à des fins d'utilisation (par les humains) ;
- *La régulation*, soit la capacité tampon des aquifères à réguler les régimes quantitatifs et qualitatifs des systèmes d'eaux souterraines ;
- *Le soutien* dont bénéficient les écosystèmes dépendants des eaux souterraines et les autres éléments environnementaux liés aux eaux souterraines ;
- Les *services culturels* en lien avec les loisirs, les traditions, les religions ou les valeurs spirituelles, qui sont associés à des sites particuliers plutôt qu'à des aquifères.

Les eaux souterraines offrent de nombreux autres avantages tels que l'accroissement de la production d'énergie géothermique, l'amélioration du stockage en vue d'assurer une meilleure sécurité de l'eau et l'adaptation aux effets du changement climatique.

Résumé

Les défis

L'épuisement des réserves d'eaux souterraines se produit lorsque les prélèvements dépassent les recharges. Bien que la variabilité du climat et le changement climatique puissent exercer une certaine influence sur ce phénomène, l'épuisement des réserves d'eaux souterraines à long terme résulte le plus souvent d'une extraction intensive. Au niveau mondial, le taux d'épuisement des réserves d'eaux souterraines est considérable : on estime qu'au début de ce siècle, il se situe entre 100 et 200 km³/an (soit environ 15 à 25 % des extractions totales d'eaux souterraines).

La pollution compromet la qualité des volumes prélevés à des fins de consommation et affecte également les écosystèmes dépendant des eaux souterraines.

Il existe de nombreuses sources de pollution anthropique des eaux souterraines : la plupart d'entre elles sont situées en surface ou à proximité, mais d'autres pollutions peuvent se produire sous la surface à une plus grande profondeur. Largement répandue, la pollution d'origine agricole agit de façon diffuse et concerne souvent de grandes quantités de nitrates, de pesticides et d'autres composés agrochimiques. Il convient de souligner que la pollution des eaux souterraines est un phénomène pratiquement irréversible : une fois pollués, les aquifères ont tendance à le rester.

La gouvernance des eaux souterraines

Les processus de *gouvernance* des eaux souterraines facilitent leur gestion ainsi que la planification et la mise en œuvre des politiques dans ce domaine. Cette gouvernance intervient à plusieurs échelles et à différents niveaux géographiques, notamment régionaux et transfrontiers. La *gestion* des eaux souterraines, en revanche, est davantage orientée vers l'action, qui inclut des activités de mise en œuvre pratique et des opérations quotidiennes. Elle se produit le plus souvent aux niveaux micro et méso.

Les eaux souterraines étant souvent considérées comme une ressource privée (c'est-à-dire une ressource qui est étroitement liée à la propriété foncière et qui, dans certaines juridictions, constitue une propriété privée), il est difficile de légiférer à leur égard comme de mettre en place une gouvernance et une gestion descendantes. Néanmoins, au vu du rôle des eaux souterraines en tant que bien commun, les gouvernements doivent assumer pleinement la responsabilité qui leur incombe comme gardiens de cette ressource.

En Afrique subsaharienne, les possibilités offertes par les grands aquifères peu profonds restent largement sous-exploitées puisque seulement 5 % des zones équipées pour l'irrigation exploitent des eaux souterraines

Les lois et règlements nationaux permettent de fixer les conditions d'accès aux eaux souterraines et d'encadrer les activités humaines qui ont un impact sur leur qualité. D'autres instruments juridiques pertinents consacrent l'accès à l'eau pour répondre aux besoins essentiels en tant que droit humain, déterminent l'accès aux eaux souterraines en tant que moyen de subsistance et de production à petite échelle, régulent les activités qui nuisent aux processus naturels de recharge et de déversement des nappes souterraines tout comme ils régulent la formation et le fonctionnement des associations d'utilisateurs afin de définir les responsabilités en matière de répartition, de surveillance et de contrôle. Les cadres juridiques doivent également prévoir la protection des zones de déversement et de recharge ainsi que celle des zones à proximité des puits d'approvisionnement en eau. Enfin, ils doivent établir des normes de rendement durable et de contrôle des extractions ainsi que des réglementations sur l'exploitation conjointe.

Dans certaines juridictions, les eaux souterraines sont soumises à la même réglementation que les eaux de surface, dont font partie les fleuves. Dans les cas où il existe des conflits entre les droits relatifs aux eaux souterraines et ceux relatifs aux eaux de surface (par exemple, dans le cas de l'assèchement d'un cours d'eau causé par le pompage intensif des eaux souterraines à proximité et vice versa), l'adoption d'une méthode de gestion conjointe est nécessaire.

Les sources ponctuelles de pollution peuvent faire l'objet d'une régulation par permis ainsi que de normes générales de qualité relatives aux effluents et/ou à l'eau environnante. En revanche, la pollution non ponctuelle provenant de sources diffuses ou indistinctes nécessite des mesures de prévention telles que la mise en place d'une réglementation de l'emploi des terres et/ou l'imposition des meilleures pratiques agricoles et environnementales.

Agriculture

Les eaux souterraines constituent une ressource essentielle pour l'agriculture irriguée, l'élevage et d'autres activités agricoles comme la transformation des aliments. Afin de répondre aux besoins hydrauliques et agricoles mondiaux d'ici à 2050, y compris à une augmentation d'environ 50 % de la demande en denrées alimentaires, en aliments pour animaux et en biocarburants par rapport à 2012, il est indispensable d'accroître la productivité agricole par l'intensification durable des extractions d'eaux souterraines tout en réduisant l'impact de la production agricole sur l'eau et l'environnement.

Partout où il en existe une source pérenne et fiable, les nappes phréatiques peuvent constituer une ressource précieuse pour les petits exploitants agricoles. Certaines régions dépendent fortement des eaux souterraines pour l'irrigation, notamment l'Amérique du Nord et l'Asie du Sud où respectivement 59 % et 57 % des zones équipées pour l'irrigation exploitent les eaux souterraines. À l'inverse, en Afrique subsaharienne, les possibilités offertes par les grands aquifères peu profonds restent largement sous-exploitées puisque seulement 5 % des zones équipées pour l'irrigation exploitent des eaux souterraines.

La pollution agricole est aujourd'hui considérée comme le principal facteur de dégradation des eaux intérieures et côtières, dépassant les pollutions provenant des établissements humains et des industries. Ainsi, les nitrates contenus dans les engrais chimiques et biologiques figurent au premier rang des contaminants anthropiques les plus répandus dans les eaux souterraines du monde entier. Épandus ou éliminés dans de mauvaises conditions, les insecticides, herbicides et fongicides peuvent également polluer les eaux souterraines avec des substances cancérigènes et d'autres substances toxiques.

De manière générale, on constate que les lois et réglementations actuelles visant à prévenir ou à limiter la pollution diffuse des eaux souterraines par les activités agricoles demeurent insuffisantes tout comme leur application. Les politiques relatives à la lutte contre la pollution de l'eau par l'agriculture doivent s'inscrire dans le cadre d'une politique agricole et d'une politique de l'eau globales à l'échelle de chaque pays, de chaque bassin hydrographique et de chaque aquifère.

L'électrification des zones rurales a largement contribué à l'exploitation des eaux souterraines, en particulier lorsque les réseaux électriques ruraux ont été étendus à des zones qui autrement auraient dépendu de carburant diesel ou de l'énergie éolienne. Les progrès réalisés dans le domaine des technologies solaires ont permis le développement de systèmes d'irrigation à énergie solaire (SPIS), utilisés à grande échelle pour desservir les exploitations agricoles. Ces systèmes présentent toutefois un risque d'utilisation non durable des ressources en eau lorsque leur mise en œuvre n'est pas gérée et réglementée de manière appropriée.

Les établissements humains

La dépendance de multiples villes à l'égard des eaux souterraines semble s'accroître de sorte que l'on estime à près de 50 %, la population urbaine mondiale aujourd'hui alimentée par des sources d'eaux souterraines. Toutefois, de nombreuses personnes pauvres en milieu urbain habitent dans des établissements périurbains, non aménagés et dépourvus de statut juridique, où les infrastructures et les services publics de distribution d'eau sont absents.

Dans la plupart des pays du monde, seules les eaux souterraines peuvent permettre, de façon concrète et abordable, de fournir un accès de base à l'eau aux populations rurales non desservies

Ces dernières années, l'utilisation de puits privés pour assurer un approvisionnement autonome en milieu urbain a proliféré au sein des économies en développement. Généralement adoptée comme stratégie d'adaptation du fait d'un approvisionnement en eau irrégulier ou insuffisant, cette pratique se perpétue ensuite comme stratégie d'évitement de tarifs plus élevés.

Dans les zones urbaines où la couverture du réseau d'égouts est réduite et où la plupart des déchets fécaux domestiques sont déversés dans des latrines à fosse, on observe les répercussions d'un assainissement insuffisant ou inapproprié sur les nappes souterraines. Les compagnies de distribution d'eau doivent, par conséquent, s'assurer, de façon plus cohérente, de la protection des sources et des puits par le biais de restrictions imposées aux cultures agricoles et à la construction de logements dans les zones de captage des eaux souterraines afin de préserver la santé publique et réduire le coût de la distribution d'eau.

Dans la plupart des pays du monde, seules les eaux souterraines peuvent permettre, de façon concrète et abordable, de fournir un accès de base à l'eau aux populations rurales non desservies. Cela est d'autant plus vrai en Afrique subsaharienne et en Asie du Sud, où la population rurale est nombreuse mais dispersée.

Les sources peu profondes sont exposées aux problèmes que pose la coexistence de systèmes d'assainissement *in-situ* et de sources d'eaux souterraines. On estime que la contamination persistante des nappes souterraines rurales par des agents pathogènes touche environ 30 % d'entre elles, ce qui a généralement un impact sur les personnes les plus marginalisées ; ainsi, les femmes et les filles sont souvent affectées de manière disproportionnée, car elles sont plus exposées aux maladies dues aux agents pathogènes et aux toxines du fait de leur plus grande exposition aux eaux usées.

Il faut ici citer en particulier les établissements, aussi bien temporaires que permanents, des personnes déplacées. Souvent densément peuplées, ces zones d'installation ne rentrent ni dans la catégorie des zones urbaines ni dans celle des zones rurales. Dans ces cas, il est vital de construire des puits de bonne conception couplés à des systèmes d'assainissement entretenus de façon appropriée.

L'industrie

Au nombre des industries qui prélèvent des eaux souterraines figurent l'industrie manufacturière, les industries minières, pétrolières et gazières, la production électrique, l'ingénierie et la construction. D'autres industries dépendent fortement des eaux souterraines pour leurs chaînes d'approvisionnement ; c'est le cas, entre autres, des secteurs de l'habillement, de l'alimentation et des boissons. De nombreux procédés industriels utilisent les ressources en eaux souterraines dans des endroits où la disponibilité des eaux de surface est limitée en quantité mais aussi lorsque la qualité est primordiale.

Grâce à leurs diverses activités, les industries pétrolières, gazières et minières disposent de nombreuses données internes sur l'emplacement et l'étendue des aquifères ainsi que sur leurs caractéristiques

Les rejets et les infiltrations d'effluents industriels non traités ou partiellement traités dans les sols peuvent entraîner la pollution des eaux souterraines. En outre, la contamination du sol et le lessivage provenant de décharges industrielles anciennes et non aménagées ainsi que d'anciennes mines peuvent porter atteinte à la santé humaine et à l'environnement.

De nombreux procédés de production nécessitent d'importantes quantités d'eau pour laver et nettoyer leurs produits en fin de chaîne de production afin d'éliminer les résidus de traitements chimiques. L'utilisation des eaux souterraines pour le refroidissement dépend fortement de l'emplacement et du type d'industrie, et varie donc considérablement d'un pays à l'autre. Enfin, les constructions souterraines telles que les tunnels nécessitent souvent un assèchement temporaire ou permanent.

Dans de nombreux cas, les exploitations minières obligent à procéder à des assèchements fréquents ou continus pour pouvoir fonctionner, ce qui entraîne un risque de contamination d'un aquifère local, potentiellement source d'eau potable. L'évacuation de l'eau pose également des problèmes liés à son traitement si celle-ci est contaminée par les activités minières. Toutefois, grâce à leurs diverses activités, les industries pétrolières, gazières et minières disposent de nombreuses données internes sur l'emplacement et l'étendue des aquifères ainsi que sur leurs caractéristiques. Ces données pourraient se révéler très précieuses pour les hydrogéologues, les gouvernements et les services de distribution d'eau.

Le secteur de l'énergie peut également avoir de vrais impacts sur la qualité des eaux souterraines. Ainsi, le charbon utilisé pour produire de l'électricité thermique peut avoir un impact considérable sur la qualité des eaux souterraines à cause du lessivage causé par le déversement des résidus de cendre de charbon. La fracturation hydraulique pour l'extraction du gaz naturel représente un autre facteur de risque important de contamination des eaux souterraines, notamment lorsqu'elle a lieu dans des aquifères peu profonds. Parmi les sources de pollution figurent les eaux usées provenant des eaux de formation, les eaux de reflux et les liquides de forage et de fracturation.

Le secteur financier exerce désormais une influence considérable dans le domaine de l'investissement durable ; cela devrait avoir un effet d'entraînement en favorisant les acteurs de l'industrie et de l'énergie qui utilisent les eaux souterraines de manière durable et en encourageant les autres à faire de même.

Les écosystèmes

Les écosystèmes dépendant des eaux souterraines (GDE) se retrouvent dans divers types de paysages, allant des vallées de haute montagne jusqu'au fond des océans, voire même dans les déserts.

Les écoulements d'eaux phréatiques alimentent les débits de base des cours d'eau et des fleuves, et déterminent leurs risques d'assèchement en période de sécheresse. Les écosystèmes terrestres dépendent des eaux souterraines dans tous les biomes du monde où les plantes peuvent y accéder. Dans les milieux arides, les points d'eau sont souvent alimentés exclusivement par des eaux souterraines, qui sont donc essentielles au maintien des réseaux alimentaires complexes des paysages arides telles les savanes. De manière générale, les zones ripicoles, les zones humides et les autres masses d'eau de surface dépendent aussi souvent des eaux souterraines.

Les écosystèmes dépendant des eaux souterraines assurent plusieurs services écosystémiques fondamentaux. Ainsi, les écosystèmes dépendant des eaux souterraines aquatiques et terrestres fournissent des habitats, favorisent la biodiversité, limitent les inondations et les sécheresses, procurent une source de nourriture et offrent des services culturels. Les écosystèmes dépendant des eaux souterraines jouent également un rôle critique dans la protection des aquifères contre la pollution en assurant une séparation physique, en favorisant des processus biophysiques comme la filtration, la biodégradation et la sorption des contaminants ainsi qu'en facilitant et en protégeant la recharge naturelle.

Grâce à la gestion des eaux souterraines, à la gestion conjointe de l'eau et des terres, aux solutions fondées sur la nature et à une meilleure protection des écosystèmes, il est possible d'améliorer la bonne santé des eaux souterraines et des écosystèmes comme des humains. Alors que la gestion des eaux souterraines se limite souvent aux eaux souterraines ou aux aquifères, il convient d'assurer une gestion conjointe des eaux souterraines et des écosystèmes afin de garantir la fourniture continue de services écosystémiques essentiels.

Le changement climatique

La mise en place d'un approvisionnement en eau résilient au changement climatique passera par une utilisation conjointe des eaux souterraines et des fleuves, lacs et autres réservoirs d'eaux de surface

Par son effet sur les précipitations et sur la drainance des eaux de surface, notamment les cours d'eau intermittents, les zones humides et les lacs, le changement climatique a un impact direct sur la recharge naturelle des nappes souterraines. Toutefois, les prédictions concernant l'ampleur des effets du changement climatique sur la recharge à l'échelle mondiale présentent des lacunes notables.

L'intensification des précipitations constitue l'un des impacts fréquents du changement climatique sur la reconstitution des nappes souterraines. Dans les zones où l'assainissement est insuffisant, les fortes précipitations peuvent conduire des agents pathogènes microbiens fécaux et des substances chimiques à travers les sols peu profonds jusqu'à la nappe.

L'élévation du niveau de la mer entraîne l'intrusion d'eau de mer dans les aquifères côtiers du monde entier. Cependant, les conséquences de l'élévation du niveau de la mer sur l'intrusion d'eau de mer sont souvent minimes par rapport à celles de l'extraction d'eaux souterraines. Le changement climatique peut avoir des répercussions plus importantes sur les eaux souterraines du fait de ses effets indirects sur la demande en eau d'irrigation, notamment en raison de l'augmentation de l'évapotranspiration qu'il provoque.

Dans de nombreuses parties du monde, la mise en place d'un approvisionnement en eau résilient au changement climatique passera par une utilisation conjointe des eaux souterraines et des fleuves, lacs et autres réservoirs d'eaux de surface. Les adaptations au changement climatique grâce aux eaux souterraines tirent parti des réserves distribuées d'eaux

souterraines et de la capacité des systèmes aquifères à stocker des excédents d'eau saisonniers ou ponctuels. Ces systèmes subissent des pertes par évaporation nettement inférieures à celles des infrastructures conventionnelles telles que les barrages de surface.

Le développement de l'énergie géothermique, une source d'énergie durable, joue un rôle considérable dans la réduction des émissions de CO_2. Les aquifères profonds peuvent également être utilisés pour le captage et le stockage du carbone, processus consistant à stocker le carbone pour freiner l'accumulation de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

Perspectives régionales

Afrique subsaharienne

L'Afrique possède d'importantes ressources en eaux souterraines. Bien que les réserves d'eaux souterraines du continent ne soient pas toutes exploitables, on estime que leur volume est cent fois supérieur à celui du renouvellement annuel des ressources en eau douce de la région. L'exploitation des eaux souterraines est une solution à fort potentiel pour répondre aux besoins croissants en eau de l'Afrique subsaharienne, tant pour assurer la survie des populations que pour promouvoir le développement économique. À ce jour, près de 400 millions d'Africains n'ont toujours pas accès à des services de base d'approvisionnement en eau.

La plupart des ressources en eaux souterraines de la région arabe ne sont pas renouvelables et doivent donc être gérées en tenant compte du fait qu'elles constituent une ressource épuisable

La plupart des pays d'Afrique de l'Ouest et d'Afrique centrale ne disposent que de peu de réserves d'eaux souterraines mais ils bénéficient de précipitations annuelles élevées et donc d'une recharge régulière. À l'inverse, de nombreux pays d'Afrique de l'Est et d'Afrique australe possèdent des réserves considérables d'eaux souterraines malgré des niveaux de recharge très faibles. Ces réserves permettent d'amortir les effets des extractions sur le système régional de nappes souterraines. Toutefois, le pompage actuel de ces eaux souterraines se fera aux dépens des générations futures.

En Afrique subsaharienne, seuls 3 % des terres cultivées sont irriguées et seulement 5 % d'entre elles sont irriguées par des eaux souterraines. Leur exploitation pourrait favoriser la croissance économique en permettant d'augmenter la superficie des zones irriguées et, de ce fait, d'améliorer les rendements agricoles et la diversité des cultures. Actuellement, en Afrique subsaharienne, cette exploitation n'est pas limitée par le manque d'eaux souterraines mais plutôt par le manque d'investissements, notamment dans les infrastructures, les institutions, les professionnels qualifiés et les savoirs ayant trait à cette ressource.

Europe et Amérique du Nord

Les caractéristiques des ressources en eaux souterraines et leur disponibilité varient entre l'Europe et l'Amérique du Nord et au sein même de ces deux régions, du fait de différences géologiques et hydrologiques. De même, la part que représentent les eaux souterraines dans le prélèvement total d'eau douce varie beaucoup d'un pays à l'autre.

Dans de nombreux pays d'Europe, les eaux souterraines fournissent principalement l'eau potable, ce qui montre bien la nécessité de contrôler la qualité de l'eau compte tenu des risques sanitaires. Les nitrates et les pesticides comptent parmi les polluants les plus fréquemment responsables d'une mauvaise qualité chimique des eaux souterraines au sein de l'Union européenne. Toutefois, si les polluants d'origine agricole prédominent, les produits chimiques industriels et les substances liées à l'exploitation minière entraînent également une pollution chimique des eaux souterraines dans plusieurs bassins hydrographiques. Il devient donc indispensable de disposer de plus amples informations sur ces polluants « nouveaux » (ou « émergents »).

Parallèlement à la nécessité d'une collaboration entre les différents utilisateurs de l'eau dans un pays donné, la nature transfrontière de nombreuses ressources en eau souterraine et, par conséquent, la nécessité d'une coopération entre juridictions, sont de plus en plus reconnues.

De manière générale, la surveillance des eaux souterraines et l'expertise dans ce domaine relèvent d'institutions spécialisées tandis que la mise en œuvre des instruments des politiques hydrauliques nécessite une coopération entre institutions. En effet, les mêmes déterminants et facteurs agissent souvent aussi bien sur les eaux souterraines que sur les eaux de surface. Ce pourquoi des politiques intégrées et des mesures visant à assurer une cohérence sont en cours d'élaboration.

Amérique latine et Caraïbes

En raison de l'abondance relative des eaux de surface et du niveau limité d'utilisation des eaux souterraines, moins de 30 % de l'eau douce prélevée en Amérique latine et dans les Caraïbes provient de sources souterraines. Dans les pays qui ont besoin des eaux souterraines, la moitié environ des extractions est utilisée pour l'irrigation, un tiers pour usage domestique et le reste pour une utilisation industrielle.

Dans toute la région, on constate des faiblesses dans la protection et la surveillance des eaux souterraines, entraînant leur exploitation intensive et/ou leur contamination, ce qui compromet à terme leur durabilité ainsi que leur accessibilité aux populations les plus vulnérables, dont l'approvisionnement en eau potable dépend de ces sources.

Dans la plupart des villes d'Amérique latine, les eaux souterraines jouent un rôle majeur dans les systèmes de distribution d'eau, même si elles ne constituent pas toujours la principale source d'approvisionnement. Elles représentent également 50 % de l'eau utilisée par le secteur industriel. Dans les Caraïbes, où les eaux de surface tendent à être relativement rares, les eaux souterraines représentent environ 50 % de l'eau prélevée.

Dans la mesure où les aquifères jouent un rôle de plus en plus important pour les écosystèmes, le développement social et les activités économiques de la région, il importe que celle-ci s'oriente vers des processus politiques favorisant une harmonisation de la prise de décision, de la surveillance et de la gestion des eaux souterraines au niveau national comme au niveau international.

Asie et Pacifique

La région Asie-Pacifique est responsable de la majeure partie des extractions d'eaux souterraines dans le monde puisqu'elle compte sept des dix pays qui en prélèvent le plus (Bangladesh, Chine, Inde, Indonésie, Iran, Pakistan et Turquie). À eux seuls, ces pays totalisent environ 60 % de toutes les extractions d'eaux souterraines de la planète.

Le secteur agricole est le premier bénéficiaire des avantages socio-économiques associés à l'utilisation des eaux souterraines. Le secteur industriel et le secteur municipal utilisent également cette ressource de manière importante. Si les eaux souterraines sont abondantes dans la majeure partie de la région, les risques d'épuisement suscitent des inquiétudes quant à la durabilité de leur emploi dans différentes zones d'Asie centrale, de Chine, d'Asie du Sud et dans certains centres urbains d'Asie du Sud-Est.

La contamination des eaux souterraines causée aussi bien par des processus anthropiques que géogéniques constitue un motif de préoccupation. Les impacts du changement climatique sur la variabilité des précipitations exacerbent encore la pression sur les ressources en eaux souterraines, en particulier dans les régions dotées d'un climat semi-aride à aride et dans les petits États insulaires en développement.

Bien qu'il existe, dans toute la région, des pratiques de gestion et des systèmes institutionnels, juridiques et réglementaires en charge des problèmes liés aux eaux souterraines, la gouvernance de celles-ci pose des difficultés en raison du régime d'accès illimité en place dans de nombreux pays. Il est donc indispensable de la renforcer en s'appuyant sur le soutien de la population et sur de plus amples capacités d'exécution.

Région arabe

La région arabe compte parmi les régions les plus pauvres en eau du monde et au moins onze des vingt-deux États arabes ont recours aux eaux souterraines comme source d'eau principale. L'extraction intensive des eaux souterraines dans de nombreuses parties de la région a entraîné une baisse des niveaux des nappes phréatiques, en particulier dans les zones agricoles et très peuplées. Cette situation est d'autant plus alarmante que les eaux souterraines constituent la principale source d'eau pour les groupes vulnérables qui ne sont pas officiellement raccordés aux services d'eau ou qui n'y ont pas accès. Les pratiques agricoles non durables ainsi que les activités industrielles et l'urbanisation ont un impact considérable sur la qualité des eaux souterraines.

La plupart des ressources en eaux souterraines de la région arabe ne sont pas renouvelables et doivent donc être gérées en tenant compte du fait qu'elles constituent une ressource épuisable. Cependant, la surveillance de l'extraction des eaux souterraines reste difficile, malgré l'émergence de nouvelles technologies. La gestion des eaux souterraines s'en trouve d'autant plus compliquée, notamment dans un contexte transfrontalier. En effet, la coopération transfrontière dans ce domaine demeure malheureusement très limitée dans la région.

Dans un contexte marqué par le changement climatique, l'importance des eaux souterraines pour la sécurité de l'approvisionnement en eau de la région requiert une meilleure gouvernance, fondée sur des politiques et des législations, des méthodes de gestion innovantes, une utilisation accrue des technologies, un financement spécifique visant à mieux comprendre cette ressource et une coopération régionale renforcée.

Renforcer et actualiser les connaissances

Le *Rapport d'étape pour la mise en œuvre de l'objectif de développement durable n° 6* souligne que les données relatives aux eaux souterraines et les initiatives de surveillance de celles-ci sont insuffisantes, insistant sur le fait que la surveillance des eaux souterraines constitue un « domaine négligé ».

Les données sur l'état des eaux souterraines collectées grâce à des fonds publics devraient restées disponibles publiquement

La quantité et la qualité des eaux souterraines doivent faire l'objet d'une surveillance sur le long terme afin de connaître le comportement et l'état des aquifères comme de repérer d'éventuels changements négatifs tels que les extractions excessives, la réduction de la recharge (notamment en raison du changement climatique) et la pollution. En règle générale, la recharge des nappes souterraines n'est pas directement mesurée mais plutôt estimée. Or, les aquifères très vulnérables qui fournissent des services à la population et à l'environnement doivent faire l'objet d'une surveillance accrue.

Aujourd'hui, le savoir scientifique en hydrogéologie, comme les méthodes et outils, sont suffisants pour résoudre la plupart des problèmes de gestion des eaux souterraines. La difficulté réside davantage dans le manque de données fiables aux fins de l'évaluation des eaux souterraines et de l'analyse de possibles scénarios d'évolution. Étant donné le caractère unique de tous les aquifères et de leurs conditions limites, il est crucial de disposer d'évaluations de l'état des nappes souterraines réalisées sur le terrain afin de permettre de concevoir des politiques et une gestion des ressources en eaux souterraines de façon éclairée.

Malgré son coût relativement élevé, la surveillance demeure un investissement judicieux : la détection des problèmes à un stade précoce peut s'avérer particulièrement rentable financièrement et permettre de mettre en place des mesures d'atténuation avant que les ressources ne se détériorent gravement. Il est possible de compléter les programmes de surveillance conventionnels par des initiatives de science participative, qui peuvent également favoriser la prise en compte des savoirs locaux dans la caractérisation hydrogéologique et l'évaluation des systèmes de nappes phréatiques. La communauté scientifique a également eu recours aux techniques de télédétection en vue de renforcer la surveillance des ressources en eau souterraine et d'en améliorer l'estimation.

Le partage des données et des informations est souvent lacunaire, en particulier dans les pays à faible revenu. Pourtant, les données sur l'état des eaux souterraines collectées grâce à des fonds publics devraient être disponibles publiquement. De même, les entreprises privées devraient publier les données et informations pertinentes concernant les caractéristiques des nappes phréatiques qui permettraient d'améliorer l'évaluation et la gestion de ces dernières. Par exemple, les données géophysiques et de forage collectées lors de l'exploration pétrolière et gazière pourraient permettre d'enrichir les connaissances dont on dispose sur l'étendue et les caractéristiques des aquifères.

On observe que de nombreux pays à revenu faible ou intermédiaire ne disposent pas de capacités hydrogéologiques suffisantes, même lorsque les eaux souterraines constituent la plus grande partie des ressources en eau qu'ils gèrent. Ces lacunes concernent bien souvent les capacités techniques comme les capacités institutionnelles.

Politiques et planification

Trop souvent, les politiques relatives aux eaux souterraines concernent principalement l'emploi des eaux souterraines après leur extraction. Cette approche ne correspond nullement à une gestion saine de l'aquifère, qui doit tenir compte de l'utilisation des terres, de la recharge des nappes phréatiques, de la protection des eaux souterraines et de la mise en œuvre de mesures visant à préserver les services et les fonctions de ces systèmes.

L'instauration d'outils de gestion des eaux souterraines nécessite d'abord la mise en place de structures juridiques et institutionnelles qui encadrent leur utilisation et leur application

Toute « stratégie de gestion des eaux souterraines » au niveau national doit se fondre dans une vision nationale plus large relative aux ressources en eau et s'appuyer sur un dialogue entre les différentes parties prenantes, des utilisateurs des eaux souterraines aux spécialistes locaux en passant par les scientifiques, les décideurs et les investisseurs. Les politiques relatives aux eaux souterraines doivent tenir compte du statut juridique et du régime de propriété qui régissent les eaux souterraines (publique ou privée) ainsi que de facteurs tels que le type d'utilisateurs, les caractéristiques des eaux de surface interdépendantes et les utilisations des terres autour des zones de recharge des aquifères. Elles doivent également permettre une prise de décision intégrée sur les ressources en eaux souterraines et les systèmes aquifères, et assurer un lien avec d'autres secteurs et domaines de la société au-delà du secteur de l'eau — notamment le développement socio-économique, l'égalité des genres et la réduction de la pauvreté, l'alimentation et l'énergie, les écosystèmes, le changement climatique et la santé humaine.

Les politiques, stratégies et plans doivent être adaptés au contexte local, en se fondant sur les priorités et les aspirations de la population locale et en s'appuyant sur des données scientifiques fiables. L'élaboration de plans peut résulter d'un effort de coopération entre les ministères nationaux, les agences régionales et locales ainsi que d'autres parties prenantes, sur la base d'un dialogue et d'un soutien technique inclusif (par exemple une cartographie participative) afin de permettre une appropriation conjointe du processus et des résultats. Ce processus doit aboutir à la rédaction d'un document officiel susceptible d'être validé, document définissant des actions réparties dans le temps et des indicateurs pouvant faire l'objet d'un suivi, de même que de bilans dans lesquels les impacts et les résultats peuvent être évalués.

La gestion des eaux souterraines

La gestion des eaux souterraines vise à contrôler l'extraction et la qualité des eaux souterraines ainsi qu'à traiter les effets de cette extraction sur les écosystèmes, les eaux de surface, l'affaissement des sols notamment. L'un des éléments les plus critiques de la gestion des eaux souterraines concerne sans doute le contrôle des emplacements d'extraction et des quantités d'eau prélevées dans l'aquifère.

L'instauration d'outils de gestion des eaux souterraines nécessite d'abord la mise en place de structures juridiques et institutionnelles qui encadrent leur utilisation et leur application. Toutefois, la gestion des eaux souterraines ne relève pas toujours du gouvernement. Les communautés et/ou les utilisateurs eux-mêmes peuvent choisir de manière indépendante de gérer l'emplacement des puits et les extractions d'eau souterraine.

La façon la plus durable et la plus rentable de gérer la qualité des eaux souterraines consiste à assurer leur protection adéquate afin d'éviter leur contamination. Cela peut passer par une cartographie de la vulnérabilité, l'établissement de zones de protection et la planification de l'utilisation des terres.

La gestion conjointe des ressources en eaux de surface et en eaux souterraines, comme le potentiel des solutions « fondées sur la nature », devraient faire l'objet d'une attention particulière. Leur intégration à la gestion de l'environnement, à la gestion de l'utilisation des terres et à la gestion de l'espace et des ressources du sous-sol sont autant de questions importantes qui relèvent de la gestion intégrée. La gestion de la recharge des aquifères (MAR) constitue une approche intégrée qui permet l'alimentation des aquifères en complément des barrages de surface et offre une alternative rentable, réduisant l'évaporation et les impacts environnementaux. MAR peut également être utilisée pour retenir les eaux pluviales urbaines et les eaux recyclées non collectées afin qu'elles puissent être employées de façon productive en cas de besoin. À l'échelle du bassin versant, MAR peut contribuer à maintenir les flux d'eau environnementaux et leur disponibilité, en créant des décalages dans les rejets d'eau dans un cours d'eau. Au cours des soixante dernières années, MAR a vu son application multipliée par dix ; toutefois, le potentiel d'expansion demeure considérable et pourrait passer des 10 km³/an actuels à environ 100 km³/an.

Aquifères transfrontaliers

Les aquifères transfrontaliers entrent de plus en plus souvent dans le cadre d'accords de coopération plus généraux, élaborés pour les bassins fluviaux transfrontaliers

Un « aquifère transfrontaliers » est un écoulement souterrain naturel qui traverse une frontière internationale. Les activités qui affectent l'aquifère dans un pays, comme les extractions massives ou la contamination, peuvent avoir un impact considérable de l'autre côté de la frontière.

La gestion des aquifères transfrontaliers se heurte souvent à un manque de volonté au niveau institutionnel et à une insuffisance des ressources pour collecter les informations nécessaires, notamment au niveau local, étant donné que la coordination, l'harmonisation et le partage des données forment la première étape d'une coopération entre pays voisins. Ces actions sont indispensables si l'on souhaite parvenir à s'accorder sur un modèle conceptuel fiable de l'aquifère, condition préalable à l'élaboration de plans de gestion. En outre, l'intégration des questions de genre dans la coopération transfrontière fournit l'occasion d'une gestion des eaux souterraines plus équitable sur le plan social.

Si le droit international de l'eau a été initialement conçu pour les eaux de surface, les aquifères transfrontaliers entrent de plus en plus souvent dans le cadre d'accords de coopération plus généraux, élaborés pour les bassins fluviaux transfrontaliers. Cela témoigne de la prise de conscience croissante de l'importance de ces aquifères.

Partout dans le monde naissent des initiatives de coopération scientifique menées dans le cadre de projets techniques sur les aquifères transfrontaliers. Ces initiatives peuvent avoir des portées diverses ; certaines se concentrent sur une évaluation scientifique conjointe tandis que d'autres s'emparent de problématiques spécifiques. Dans ce cas, les organisations régionales et internationales ainsi que les donateurs peuvent jouer un rôle essentiel, notamment lorsque les pays concernés ne sont pas sur un pied d'égalité en termes de capacités, de connaissances et d'informations, ou lorsque la confiance fait défaut.

Financement

Contrairement aux eaux de surface, pour lesquelles les coûts d'investissement sont généralement assumés par le secteur public, les infrastructures d'exploitation des eaux souterraines sont généralement financées par l'utilisateur final, qu'il s'agisse d'une industrie, d'un foyer, d'un agriculteur ou d'une communauté. Les utilisateurs accèdent à la ressource directement et de manière décentralisée. L'utilisateur final investit donc son capital privé dans le financement de l'accès aux eaux souterraines, qui consiste généralement en un coût fixe pour un puits et un coût variable pour le pompage. Dans certains pays, un droit d'extraction ou un tarif pour les eaux souterraines peuvent être appliqués, mais ces droits et tarifs reflètent rarement les coûts et la valeur réels de cette ressource.

Les gouvernements doivent considérer et accepter leur rôle potentiel dans la promotion de la durabilité des ressources en eau souterraine en tenant compte du contexte local et utiliser des ressources financières limitées de façon plus efficace en mettant en place des initiatives adaptées. De même, les budgets publics devraient, au minimum, financer la surveillance des eaux souterraines — qu'il s'agisse de qualité, de quantité ou des coûts d'exploitation et d'entretien qui y sont liés — et favoriser l'investissement privé en finançant les premiers projets d'exploration et de gestion.

Les pays doivent impérativement s'engager à instaurer un cadre approprié et efficace pour la gouvernance des eaux souterraines

L'exploitation et la gestion durables des eaux souterraines pourraient encore être davantage intégrées à d'autres projets et initiatives au sein du secteur de l'eau. Par exemple, le stockage et l'extraction des eaux souterraines peuvent être intégrés à la distribution d'eau dans les villes afin d'accroître la sécurité et la flexibilité en cas de variation saisonnière de la ressource. Cela permettrait d'optimiser les financements existants provenant de l'aide publique au développement, de la facturation des services d'eau et d'assainissement, et même des partenariats public-privé. Les redevances et les taxes dans d'autres secteurs comme l'agriculture peuvent également contribuer à financer les projets relatifs aux eaux souterraines et à réduire les éventuels impacts négatifs.

Dans de nombreux pays, les activités financées par des fonds publics dans divers secteurs contribuent à l'épuisement ou à la pollution des eaux souterraines. À titre d'exemple, les subventions dans le secteur de l'énergie qui conduisent à la surexploitation des eaux souterraines en réduisant les frais d'électricité ou les subventions agricoles qui encouragent les cultures à forte demande en eau peuvent devenir des incitations perverses. Dans le cadre des programmes de financement, il conviendrait donc de procéder à une réforme des subventions préjudiciables et de les rendre conformes aux politiques portant sur les eaux souterraines.

Aller de l'avant

L'Assemblée générale des Nations Unies et le Conseil des droits de l'homme ont reconnu l'accès équitable à l'eau potable et à l'assainissement comme deux droits humains fondamentaux. Les États Membres de l'ONU se doivent de faire respecter ces droits à l'eau potable et à l'assainissement au moyen de plans d'action ou de stratégies, de même qu'à la protection des eaux souterraines et à la recharge des aquifères puisque les eaux souterraines constituent une composante essentielle de l'approvisionnement en eau et de l'assainissement.

Les pays doivent impérativement s'engager à instaurer un cadre approprié et efficace pour la gouvernance des eaux souterraines. Pour cela, les gouvernements doivent prendre l'initiative et la responsabilité de mettre en place - et de maintenir - une structure de gouvernance pleinement opérationnelle, comprenant des connaissances de base, une capacité institutionnelle, des lois, des règlements et leurs outils d'application, des politiques et une planification, une participation des parties prenantes ainsi que des financements

appropriés. Il incombe également aux pays de veiller à ce que leurs politiques et leurs plans soient pleinement mis en œuvre dans le cadre de la gestion des eaux souterraines. Les eaux souterraines étant un bien commun et public, il est impératif que les gouvernements assument pleinement la responsabilité qui leur incombe en tant que gardiens de cette ressource et veillent à ce que l'accès à celle-ci (et aux avantages qui en découlent) soit équitablement réparti et que les générations futures puissent en bénéficier.

Coda

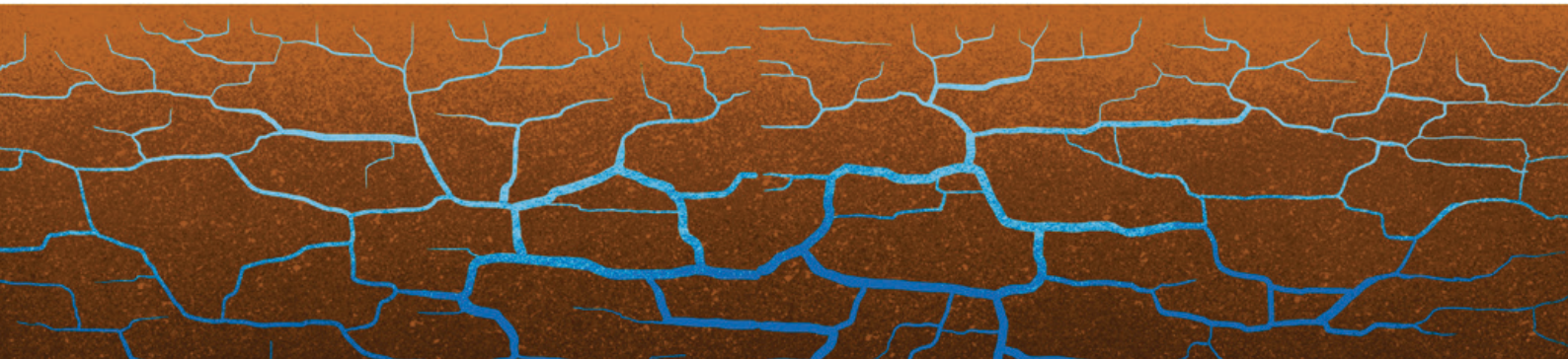
L'ensemble des ressources en eaux souterraines de notre planète représente une réserve d'eau douce considérable. Dans un monde où la demande en eau ne cesse de croître, où les ressources en eaux de surface sont souvent rares et de plus en plus sollicitées, la valeur des eaux souterraines qui ont permis aux sociétés humaines de prospérer depuis plusieurs milliers d'années est en passe d'être universellement reconnue.

Toutefois, en dépit de leur abondance relative, les eaux souterraines restent menacées par la surexploitation et par la pollution, deux phénomènes qui peuvent avoir des effets dévastateurs sur cette ressource et sa disponibilité. Il faudra consentir des efforts importants et concertés pour assurer une gestion et une utilisation durables des eaux souterraines en vue de tirer parti de tout leur potentiel. Pour y parvenir, commençons par rendre visible l'invisible.

Prologue

L'état des ressources en eaux souterraines

WWAP
Michela Miletto, Jac van der Gun et Richard Connor



En prélude au présent *Rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau 2022*, ce prologue fournit des statistiques, des données et d'autres informations générales sur certaines caractéristiques d'ensemble et sur l'état des ressources mondiales en eau ainsi que sur les évolutions observées. Ces informations chiffrées, ventilées entre niveaux mondial, continental ou régional, reposent sur un grand nombre d'observations non coordonnées portant sur des variables difficiles à évaluer et dont le traitement n'est pas toujours exposé. Par conséquent, ces informations présentent nécessairement un degré élevé d'incertitude, au point que différentes valeurs d'une même variable peuvent être fournies. Nonobstant, nous estimons que les informations présentées permettront de mieux comprendre le cadre et le contexte macroscopiques des différents thèmes abordés en relation avec les eaux souterraines au fil des chapitres du présent rapport, si tant est que les faiblesses mentionnées soient dûment prises en considération.

Les volumes d'eau douce

L'eau est le liquide que l'on trouve le plus en abondance sur Terre bien qu'elle soit, pour l'essentiel, salée. Au fil des années, les scientifiques ont produit des estimations du volume mondial d'eau douce. Ainsi, Shiklomanov et Rodda (2003) concordent avec l'estimation de Garmonov publié par Korzun (1974) selon laquelle le volume d'eau douce liquide dans le monde (moins de 1 % de toute l'eau présente sur Terre, que ce soit sous forme liquide, solide ou gazeuse) représente 10,6 millions de km³, ce qui équivaut à une couche d'eau de 79 m (profondeur équivalente) sur toute la surface terrestre du globe à l'exception de l'Antarctique. Or, ce volume est constitué à près de 99 % d'eaux souterraines et seuls 1,4 million de km³ des réserves d'eaux souterraines sont « modernes », c'est-à-dire qu'elles se sont constituées dans le sous-sol il y a moins de cinquante ans (Gleeson et al., 2016). D'autres estimations plus récentes du volume mondial d'eau douce incluent celles de Kotwicki (2009) et celles de Ferguson et al. (2021), qui l'évaluent respectivement à 11,1 millions de km³ et 15,9 millions de km³ (pour la seule composante d'eau douce souterraine). Néanmoins, il convient de noter que toutes ces estimations reposent en partie sur des hypothèses purement arbitraires et qu'il est donc impossible de déterminer laquelle d'entre elles est la plus réaliste. Toutes comportent à l'évidence une grande marge d'incertitude.

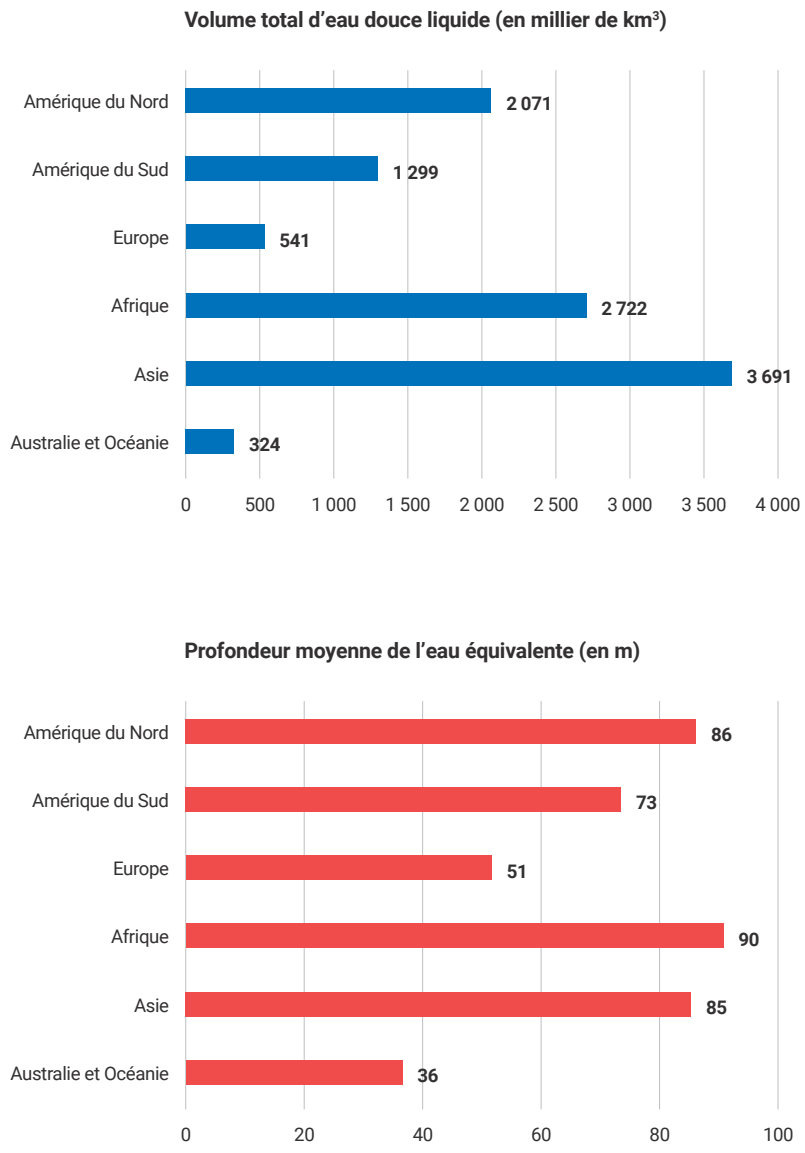
À l'instar des volumes d'eau douce, les taux de renouvellement des ressources en eau douce varient considérablement d'un endroit à l'autre

La répartition du volume d'eau douce sur les continents est inégale en raison, d'une part, des différences de taille entre les continents et, d'autre part, des différences dans le volume moyen d'eau douce présent par unité de terrain. La figure 1 présente une répartition établie par Korzun (1974) à partir de l'estimation de Garmonov. À l'échelle des pays et des territoires plus petits, la variation spatiale de la profondeur d'eau équivalente est beaucoup plus prononcée, ses valeurs allant de zéro à près de 2 000 mètres.

Les variations des volumes d'eau douce dans le temps, telles celles causées par les variations saisonnières du climat, le changement climatique et l'exploitation intensive, n'ont, à l'échelle d'une vie humaine, aucun effet notable sur les volumes indiqués dans la figure 1. Cependant, les mêmes variations, sur une même période, peuvent avoir des impacts considérables au niveau local ou régional. À titre d'exemple, on peut citer : a) le rétrécissement de lacs comme le lac Tchad, la mer d'Aral, le lac d'Ourmia, le Grand Lac Salé et le lac Poopó (Wurtsbaugh et al., 2017) ; b) la disparition de nombreuses sources d'eau dans le monde et la diminution du débit de cours d'eau comme le fleuve Jaune, le Gange, le Río Grande, le Congo, le Murray et le Darling (Shi et al., 2019) ; c) la baisse constante du niveau des eaux souterraines dans les systèmes aquifères exploités de manière intensive, notamment le bassin du Gange-Brahmapoutre, la grande plaine de Chine du Nord et la vallée centrale de Californie (Shamsudduha et Taylor, 2020).

Figure 1

Estimation des volumes d'eau douce liquide présents sur les différents continents



Source : Shiklomanov et Rodda (2003) à partir des données de Korzun (1974).

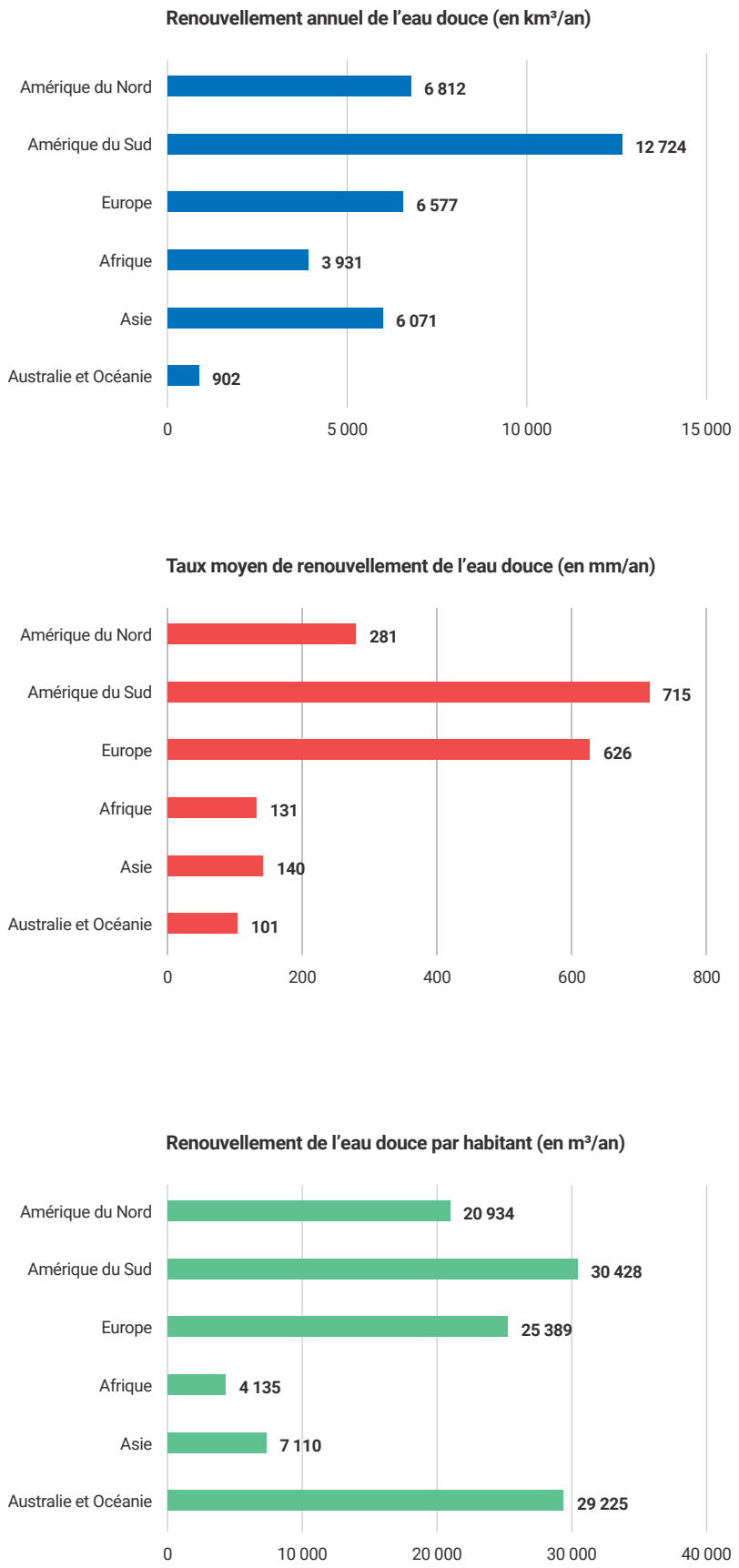
Le renouvellement des ressources en eau douce

Le taux de renouvellement définit la limite supérieure théorique à partir de laquelle un prélèvement d'eau est durable. Le renouvellement des ressources en eau douce (provenant principalement de l'eau de la partie terrestre du cycle de l'eau restant en mouvement) consiste en un remplacement des volumes s'écoulant dans les cours d'eau, les sols et les aquifères, et permet aux humains de prélever l'eau sans épuiser la réserve. À l'instar des volumes d'eau douce, les taux de renouvellement des ressources en eau douce varient considérablement d'un endroit à l'autre. Même décomptés au niveau des continents, ils présentent des différences notables (figure 2).

Bien entendu, les variations constatées à l'échelle des continents dans les volumes d'eau douce renouvelés (dont la quantité moyenne s'établit à 37 000 km³ par an) résultent en partie des différences de taille entre les continents, mais aussi des différences significatives entre les taux de renouvellement par unité de surface (profondeur de l'eau en mm par an). Ainsi, les profondeurs moyennes de renouvellement des ressources en eau douce des continents relativement humides que sont l'Amérique du Sud et l'Europe sont quatre à sept fois plus grandes que celles de l'Asie, de l'Afrique, de l'Australie et de l'Océanie, continents qui abritent

Figure 2

Estimation du renouvellement des ressources en eau douce sur les différents continents, 2015



Source : Ritchie et Roser (2017), à partir des des données d'Aquastat.

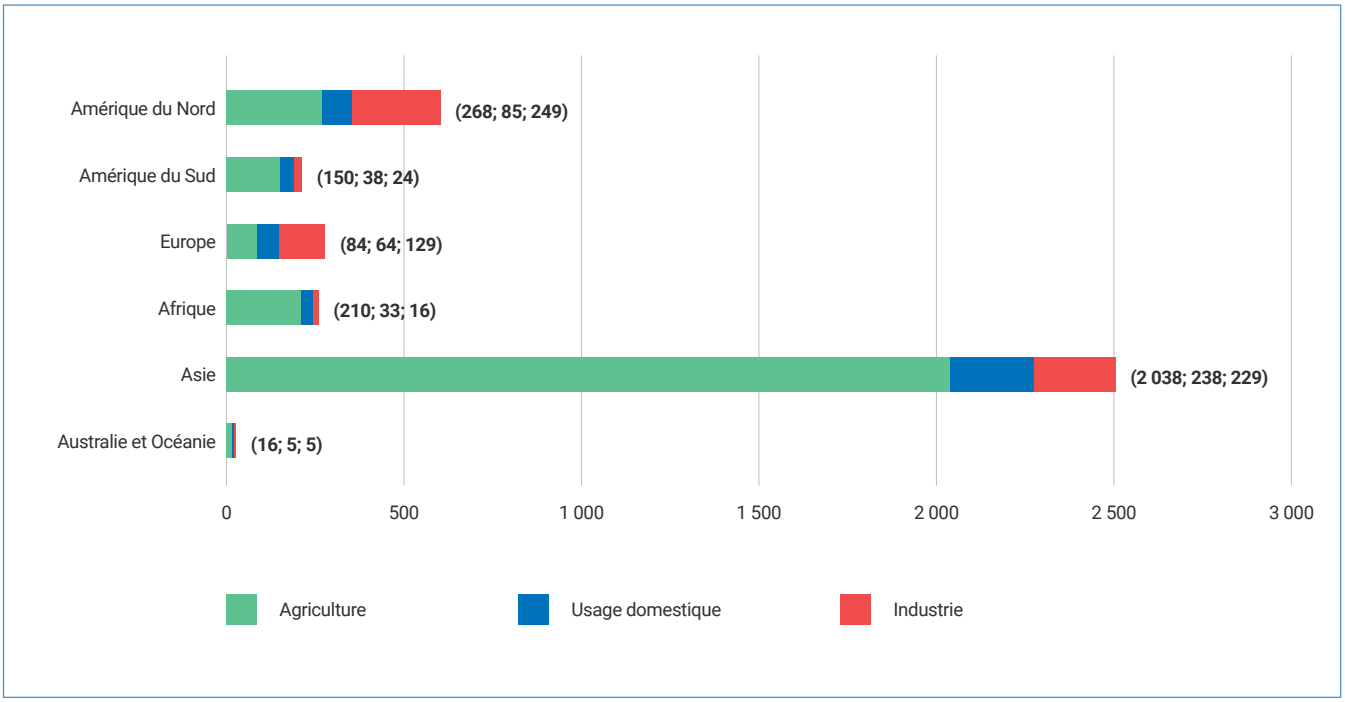
chacun de vastes territoires arides et semi-arides. Selon les données présentées par Ritchie et Roser (2017), le renouvellement annuel moyen des ressources en eau douce sur l'ensemble de la surface terrestre mondiale (à l'exception de l'Antarctique) équivaut à une profondeur hydrique de 274 mm, soit 0,35 % seulement de la profondeur moyenne des réserves en eau douce, ce qui implique une durée de séjour de près de trois cents ans. L'Afrique et l'Asie possèdent les taux de renouvellement des ressources en eau douce par habitant les plus faibles.

Prélèvements d'eau douce, stress hydrique et pénuries d'eau

Au cours du siècle dernier, les prélèvements d'eau douce dans les cours d'eau, les lacs, les aquifères et les réservoirs artificiels (appelés aussi sources d'« eau bleue ») ont fortement augmenté et continuent de croître dans la plupart des régions du monde. En effet, au début du XXe siècle, les prélèvements d'eau douce dans le monde avoisinaient probablement 600 km³/an alors qu'en 2017, d'après des estimations récentes, ils atteignaient 3 880 km³/an (ONU, 2021 ; Aquastat, n.d.). Dans les années 1950-1980, le taux d'augmentation fut particulièrement élevé (environ 3 % par an) ; cela s'explique, d'une part, par une croissance démographique plus élevée et, d'autre part, par l'essor rapide de l'exploitation des eaux souterraines, notamment à des fins d'irrigation. Aujourd'hui, ce taux se situe autour de 1 % par an, ce qui correspond au taux de croissance démographique actuel.

Comme le montre la figure 3, l'Asie est responsable de la majeure partie des prélèvements d'eau douce dans le monde (64,5 %) devant l'Amérique du Nord (15,5 %), l'Europe (7,1 %), l'Afrique (6,7 %), l'Amérique du Sud (5,4 %), l'Australie et l'Océanie (0,7 %).

Figure 3 Prélèvements d'eau douce en 2017, ventilés par continent et par secteur d'utilisation (en km³/an)



Source : à partir des données d'Aquastat (n.d.).

Si l'on compare les données ci-dessus avec les estimations du renouvellement des ressources en eau douce (figure 2), on constate qu'à l'échelle mondiale, le taux de prélèvement d'eau douce représente 10,5 % du taux de renouvellement annuel moyen des ressources en eau douce. Ces pourcentages varient considérablement d'un continent à l'autre : ils sont élevés en Asie (41,3 %), faibles en Amérique du Sud (1,7 %) et en Australie et Océanie (2,9 %). Ils prennent des valeurs intermédiaires en Afrique (6,6 %), en Amérique du Nord (8,8 %) et en Europe (4,2 %).

Si le taux d'augmentation de l'utilisation des ressources en eau douce a diminué dans la plupart des pays développés, il continue de croître dans la majorité des économies émergentes ainsi que dans les pays à revenus faible et intermédiaire. Au cours des trente prochaines années, l'utilisation des ressources en eau douce dans le monde devrait continuer d'augmenter de près de 1 % par an, sous l'effet d'une demande croissante des secteurs de l'industrie et de l'énergie ainsi que des municipalités et des foyers en raison, principalement, du développement industriel et de l'amélioration de la distribution d'eau et de l'assainissement, conjugués à la croissance démographique, au développement économique et à l'évolution des modes de consommation (ONU, 2021).

Près de 4 milliards de personnes vivent dans des zones touchées par une grave pénurie d'eau au moins un mois par an

Lorsque le niveau des prélèvements est exprimé en pourcentage du renouvellement, il devient un indicateur de stress hydrique couramment utilisé, mais lorsqu'il est additionné sur de larges zones et utilisé avec des données annuelles moyennes, il ne permet pas de détecter les zones en situation de stress hydrique. Cet indicateur prend tout son sens lorsqu'il est utilisé avec une résolution spatiale plus élevée et en tenant compte des variations saisonnières ; mais il présente encore quelques défauts, notamment parce qu'il ne tient pas compte des débits écologiques et des retours d'eau prélevée non consommée, tout en donnant des résultats dont l'interprétation peut s'avérer souvent incertaine.

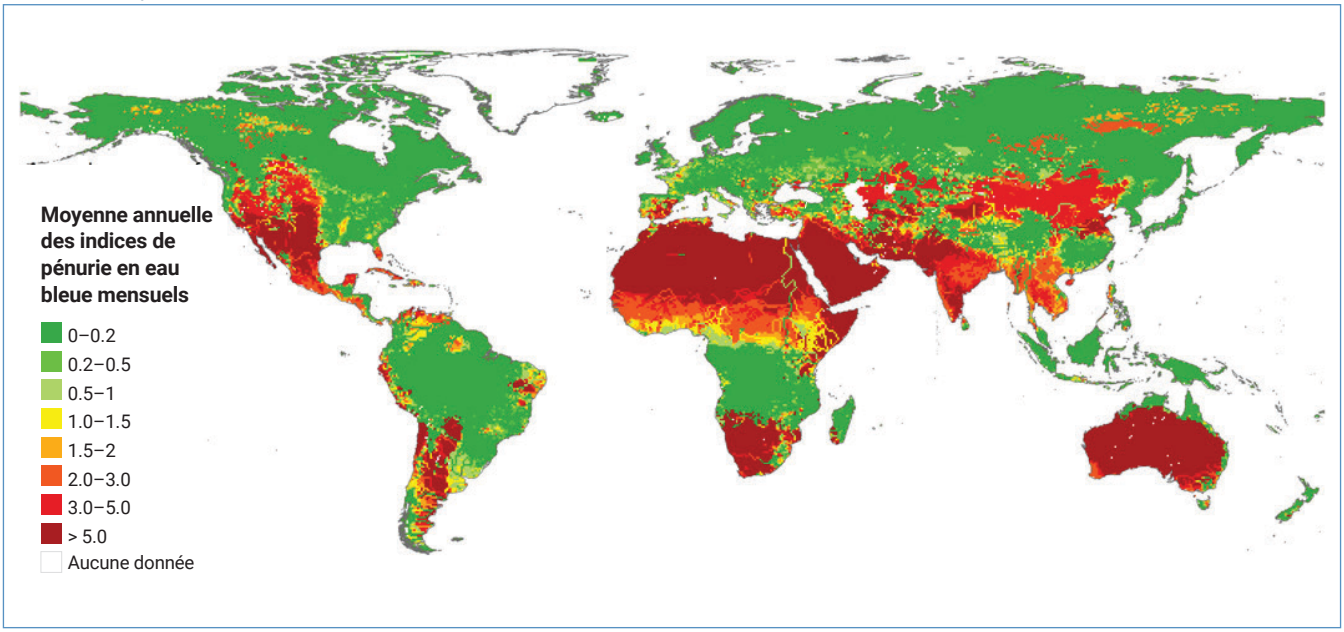
L'indice de pénurie en eau bleue, introduit par Mekonnen et Hoekstra (2016), a permis de remédier à ces lacunes. Cet indice se définit comme l'empreinte eau bleue divisée par la disponibilité de cette dernière. L'« empreinte eau bleue » correspond à la consommation ou aux prélèvements nets d'eau bleue. Elle équivaut au volume d'eau bleue (ressources en eau douce de surface et en eaux souterraines combinées) qui est prélevé et qui ne retourne pas aux systèmes de nappes phréatiques et d'eaux de surface parce que l'eau s'est évaporée ou a été incorporée dans un produit. La disponibilité de l'eau bleue sur une zone donnée est calculée en faisant la somme du ruissellement généré dans cette zone et reçu en amont, moins le débit écologique optimum de toutes les zones contributrices et moins l'empreinte eau issue de toutes les zones contributrices qui se trouvent en amont. La figure 4 présente une simulation des variations mondiales moyennes annuelles de la pénurie d'eau bleue tandis que la figure 5 (établie à partir de simulations par mois civil) fournit le nombre de mois par an au cours desquels l'indice de pénurie en eau bleue dépasse 1,0, ce qui constitue un taux de prélèvement non viable. Près de 4 milliards de personnes vivent dans des zones touchées par une grave pénurie d'eau au moins un mois par an (Mekonnen et Hoekstra, 2016). En général, les solutions adoptées dans les zones où l'indice de pénurie annuel dépasse 1,0 comprennent des transferts d'eau depuis les zones voisines excédentaires (si elles sont disponibles) ou l'appauvrissement des masses d'eau stockées dans les lacs, les réservoirs d'eau de surface et — surtout — les aquifères.

Les ressources en eaux souterraines et leur répartition géographique

Partout sur la planète, de larges volumes d'eau douce se trouvent présents sous la surface du sol, mais leur abondance et les conditions dans lesquelles ils peuvent être extraits varient considérablement d'un endroit à l'autre. Pour fonctionner, les puits doivent pénétrer dans des formations géologiques caractérisées par une porosité et une perméabilité relativement élevées (appelées « aquifères », voir chapitre 1) et remplies d'eau douce souterraine. Les cartes hydrogéologiques montrent la configuration et les limites des zones où se trouvent ces formations avantageuses (aquifères), alternant avec des zones dominées par des formations géologiques qui ne peuvent procurer des quantités d'eau significatives aux puits. En outre, le potentiel d'un lieu ou d'une zone pour l'extraction d'eaux souterraines dépend également du taux de régénération de l'aquifère exploité (recharge de la nappe souterraine) et de la qualité de l'eau qu'il contient. La recharge permet de prélever les eaux souterraines de manière durable ; si elle est inexistante ou trop faible, les extractions d'eaux souterraines épuisent le volume d'eau stocké.

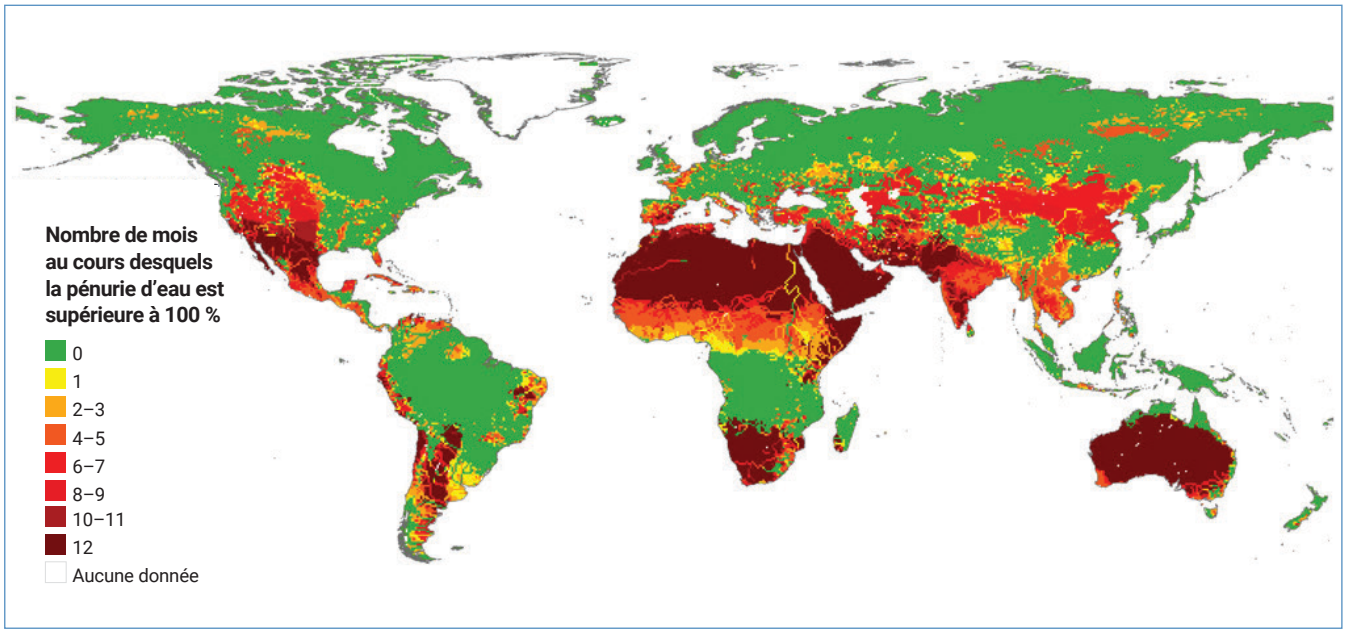
La figure 6 présente une carte hydrogéologique simplifiée à l'échelle mondiale. Elle montre les principaux bassins hydrogéologiques (en bleu) sur tous les continents, dont certains sont dotés de taux de recharge élevés ou moyens tandis que d'autres (dans les zones arides et de pergélisol) ne sont pas ou peu rechargés. Ces grands bassins hydrogéologiques renferment la

Figure 4 Moyenne annuelle des indices mensuels de pénurie en eau bleue avec une résolution de 30x30 minutes d'arc, 1996-2005



Source : Mekonnen et Hoekstra (2016, fig. 2, p. 3).

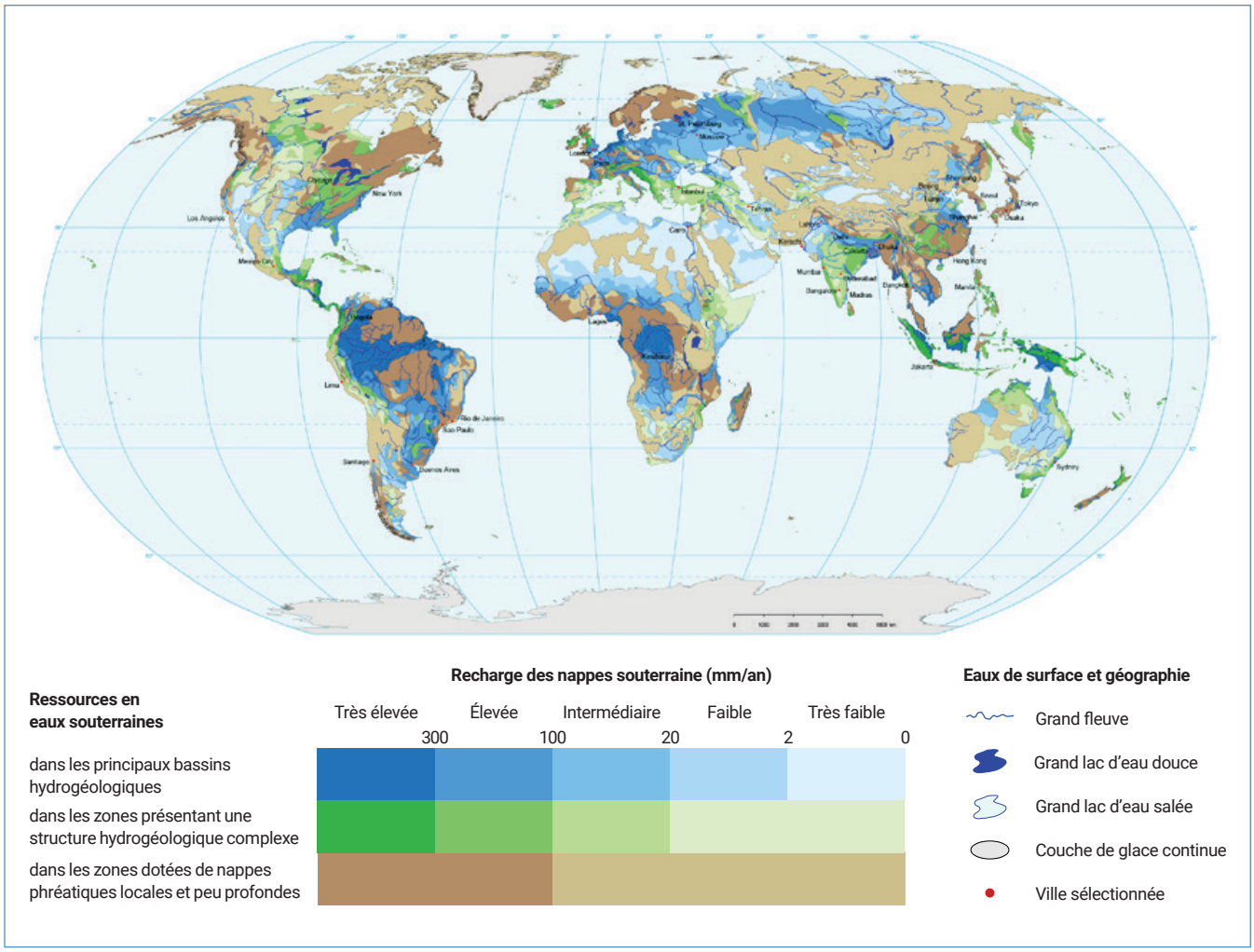
Figure 5 Nombre de mois par an au cours desquels l'indice de pénurie en eau bleue dépasse 1,0, 1996-2005



Source : Mekonnen et Hoekstra (2016, fig. 3, p. 3).

majeure partie de toutes les réserves d'eau douce stockées sur Terre et offrent, en général, les conditions optimales à l'extraction des eaux souterraines. Les zones présentant une structure hydrogéologique complexe (en vert) sont constituées de couches épaisses de formations qui laissent également circuler des quantités importantes d'eaux souterraines (souvent stockées et s'écoulant par des fissures plutôt que par des pores), mais leur productivité a généralement tendance à être inférieure en moyenne à celle des principaux bassins hydrogéologiques.
Le troisième grand ensemble cartographique (en marron) représente les zones les moins avantageuses pour l'exploitation des eaux souterraines ; toutefois, il convient de noter qu'il s'agit d'une caractérisation macroscopique, non appropriée pour des évaluations à l'échelle locale. En effet, outre les zones non productives, on y trouve de nombreux aquifères relativement petits et/ou peu profonds qui peuvent néanmoins jouer un rôle essentiel au niveau local ou régional. C'est pourquoi, pour les projets locaux, il est recommandé de consulter des cartes hydrogéologiques à l'échelle locale.

Figure 6 Ressources en eaux souterraines dans le monde



Source : BGR/UNESCO (2008).

Les eaux souterraines douces et saumâtres ne se trouvent pas seulement dans le sous-sol des continents et des îles : elles sont également présentes au large des côtes. La figure 7 illustre les résultats d'un inventaire récent des eaux souterraines offshore. Une petite partie de ces nappes d'eau douce ou saumâtre reçoit une recharge contemporaine (par des apports latéraux entrant depuis un système phréatique terrestre connecté), mais la plupart d'entre elles constituent des ressources non renouvelables. La faisabilité et l'attrait de l'exploitation de ces nappes d'eau douce et saumâtre offshore aux fins d'un approvisionnement en eau futur doivent encore faire l'objet de recherches.

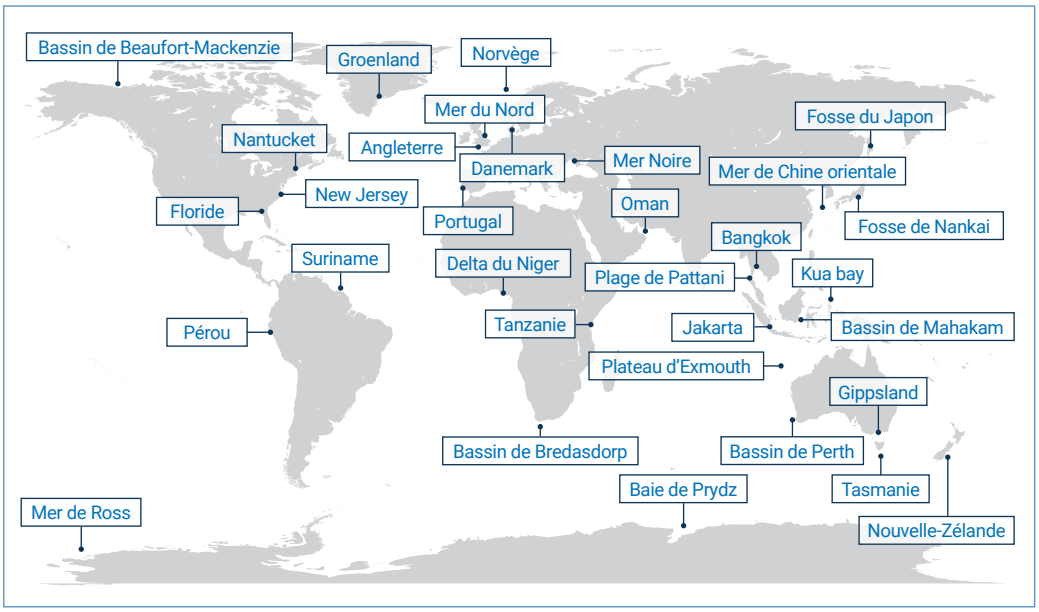
Prélèvements et utilisations des eaux souterraines

En réponse à l'augmentation rapide de la demande en eau et à la faveur des progrès techniques, scientifiques et économiques, les extractions d'eaux souterraines se sont accrues en flèche dans la plupart des pays du monde au cours du XXe siècle, atteignant des niveaux sans précédent au début de notre siècle. Le tableau 1 donne des estimations des extractions d'eaux souterraines au cours de l'année 2017, ventilées entre régions et continents. D'après ce tableau, 959 km³ d'eaux souterraines ont été prélevés dans le monde en 2017 suivant une répartition inégale à travers le globe [1]. Il est frappant de constater que les deux tiers de ces volumes ont été prélevés en Asie, principalement en Asie du Sud et de l'Est. La deuxième place du classement par continent revient

[1] Les données publiées peu avant la finalisation du présent rapport font état de 978 km³ d'eaux souterraines prélevées dans le monde en 2018. L'écart avec l'estimation établie pour 2017 se justifie par la marge des variations interannuelles et les inexactitudes des mesures.

Figure 7

Carte mondiale des zones connues d'eaux douces et d'eaux saumâtres souterraines offshore



Source : basé sur Post et al. (2013, fig. 1, p. 72).

Bien que l'Afrique concentre environ 17 % de la population mondiale (1,4 milliard d'habitants), ses extractions d'eaux souterraines sont comparativement faibles, représentant un peu moins de 5 % du total mondial

à l'Amérique du Nord, qui est responsable de 16 % des prélèvements d'eaux souterraines dans le monde. En effet, sur les dix pays qui prélèvent le plus d'eaux souterraines (75 % du total), huit sont situés en Asie (par ordre décroissant, l'Inde, la Chine, le Pakistan, l'Iran, l'Indonésie, le Bangladesh, l'Arabie saoudite et la Turquie) et deux en Amérique du Nord (les États-Unis d'Amérique et le Mexique) (voir tableau 5.1). Bien que l'Afrique concentre environ 17 % de la population mondiale (1,4 milliard d'habitants), ses extractions d'eaux souterraines sont comparativement faibles, représentant un peu moins de 5 % du total mondial. L'Australie et l'Océanie, du fait de leur population limitée, comptent également pour une part très faible des extractions d'eaux souterraines au niveau mondial.

Si l'on compare les données ci-dessus avec les estimations réalisées pour l'année 2010 (Margat et Van der Gun, 2013), on constate que le taux mondial de prélèvements totaux n'a pas évolué de manière significative entre 2010 et 2017. Néanmoins, au niveau régional, les taux d'évolution varient considérablement. Bien que ces taux semblent assez élevés pour certaines des régions, ils ne permettent pas de tirer des conclusions définitives sur les évolutions étant donné que les écarts calculés peuvent être causés par des variations climatiques interannuelles ou même par des erreurs dans les comptes rendus des agences nationales. L'examen de séries chronologiques de relevés annuels révèle que les taux d'extraction des eaux souterraines dans la plupart des pays européens se sont stabilisés, voire sont en légère baisse. Il semblerait qu'il en soit de même dans le nord de l'Amérique du Nord (c'est-à-dire au Canada, aux États-Unis et au Groenland) ainsi qu'en Asie du Sud et de l'Est. Manifestement, l'extraction d'eaux souterraines dans les pays concernés a atteint des niveaux d'intensité au-delà desquels l'expansion n'est plus souhaitable ou possible.

Le tableau 1 indique également qu'au niveau mondial, les prélèvements d'eaux souterraines correspondent actuellement à 25 % de toute l'eau douce prélevée. Ce pourcentage varie selon les continents : il est faible en Amérique du Sud, dont une grande partie dispose d'abondantes ressources permanentes en eaux de surface, et élevé en Australie et en Océanie, où les ressources en eau de surface se font rares.

Le tableau 2 présente la répartition des prélèvements d'eaux souterraines par secteur d'utilisation de l'eau. On constate que 69 % du volume total est prélevé pour un usage agricole, 22 % pour des usages domestiques et 9 % pour des usages industriels. Il convient toutefois de préciser que cette répartition varie selon les continents. Les chapitres 3, 4 et 5 du présent rapport fournissent de plus amples informations sur les différents usages anthropiques des eaux souterraines tandis que le chapitre 6 traite des services *in-situ* qu'offrent les eaux souterraines aux écosystèmes.

Tableau 1 Prélèvements d'eaux souterraines en 2017 répartis selon les principales régions du monde

Continent et région	Prélèvement d'eaux souterraines (en km³/an)	Évolution en % depuis 2010	Pourcentage du prélèvement total d'eau douce
Amérique du Nord	156	0	26
Nord de l'Amérique du Nord	113	-1	24
Amérique centrale	37,1	+12	38
Caraïbes	6,5	-37	27
Amérique du Sud	27	+6	13
Nord et Est de l'Amérique du Sud	7,9	-32	9
Pays andins	4,7	-22	11
Sud de l'Amérique du Sud	14,7	+83	19
Europe	65	-6	23
Europe du Nord	4,7	-3	20
Europe de l'Ouest	15,2	+1	22
Europe de l'Est	15,2	-24	18
Europe méridionale	29,7	+1	31
Afrique	45	+10	20
Afrique du Nord	26,2	+24	21
Afrique de l'Ouest	8,0	+9	28
Afrique centrale	2,1	-21	72
Afrique de l'Est	6,3	-6	13
Afrique australe	2,8	-16	14
Asie	657	-4	26
Asie du Nord	3,1	-10	15
Asie centrale	2,7	-85	2
Asie de l'Ouest	63,7	-3	39
Asie du Sud	401	-5	39
Asie de l'Est	132	-6	18
Asie du Sud-Est	54,2	+54	11
Australie et Océanie	8	+21	31
Australasie	7,5	+30	29
Micronésie, Mélanésie, et Polynésie	0,6?	-36?	79?
Monde	959	-2	25

Source : estimations tirées d'Aquastat (n.d.), Eurostat (n.d.) et Margat et Van der Gun (2013).

Tableau 2 Répartition des prélèvements d'eaux souterraines en 2017 par secteur d'utilisation et par continent

	Prélèvement d'eaux souterraines		Volumes par secteur d'emploi de l'eau			Pourcentage par secteur d'emploi de l'eau		
	(en km³/an)	en % du total mondial	Agriculture	Domestique	Industrie	Agriculture	Domestique	Industrie
Amérique du Nord	156	16	97	48	12	62	30	7
Amérique du Sud	27	3	13	9	5	49	32	20
Europe	65	7	24	29	12	36	45	19
Afrique	45	5	29	14	2	65	32	4
Asie	657	68	496	107	53	76	16	8
Australie et Océanie	8	1	4	4	0	48	48	3
Monde	**959**	**100**	**664**	**211**	**84**	**69**	**22**	**9**

Source : estimations tirées d'Aquastat (n.d.), d'Eurostat (n.d.) et Margat et Van der Gun (2013).

Contraintes naturelles propres aux zones d'extraction des eaux souterraines

De toute évidence, l'absence d'aquifères exploitables dans une zone donnée constitue une contrainte majeure pour le prélèvement d'eaux souterraines. À ce titre, les cartes hydrogéologiques permettent de déterminer la présence ou l'absence de tels aquifères. Toutefois, d'autres contraintes naturelles influent sur l'extraction d'eaux souterraines ; on trouvera ci-après une brève description de quelques-unes d'entre elles.

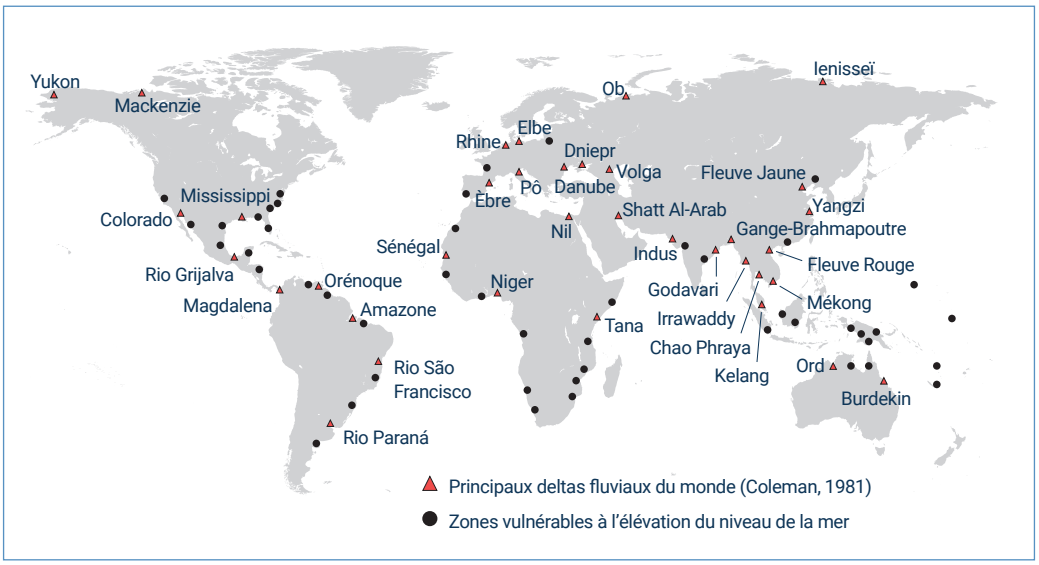
La mauvaise qualité des eaux souterraines constitue un obstacle majeur à leur extraction. En effet, il faut savoir que si la plupart des nappes phréatiques situées à quelques centaines de mètres au-dessous de la surface du sol contiennent de l'eau douce, plus de la moitié des eaux souterraines sous la surface du globe sont salines et ne conviennent donc pas à la plupart des utilisations. La salinité élevée des eaux souterraines prévaut dans les couches les plus profondes des bassins sédimentaires (paléo-salinité), mais dans de nombreuses zones dans le monde, elle est également observée à des profondeurs moindres, par exemple dans les zones côtières et dans les zones où la nappe phréatique est très peu profonde sous des climats arides (Van Weert et al., 2009). De plus, dans certaines régions, les eaux douces souterraines contiennent des concentrations excessives de contaminants naturels tels que l'arsenic et le fluorure.

Un autre obstacle à l'extraction des eaux souterraines a trait à la profondeur à laquelle elles se trouvent. Si l'exploitation des aquifères nécessite des forages très profonds ou si le niveau des nappes phréatiques est très bas sous la surface des sols, le coût de la construction d'un puits ou du pompage peut devenir trop élevé pour la plupart des utilisateurs et pour les usages prévus. Cette contrainte tend à exacerber les différences d'accès entre les personnes pauvres et les personnes riches au sein d'une même communauté.

En outre, l'extraction d'eaux souterraines à proximité des côtes dans les aquifères côtiers peut entraîner une intrusion d'eau de mer, qui met fin au prélèvement d'eau douce qui pourrait s'y trouver. De même, l'élévation du niveau de la mer rendra plus difficile l'extraction d'eaux souterraines dans les aquifères côtiers de faible altitude. La figure 8 fait apparaître les zones sensibles où les eaux souterraines sont vulnérables à l'intrusion d'eau de mer et à l'élévation du niveau de la mer. La présence d'eaux souterraines salines ou saumâtres sous les nappes d'eau douce peu profondes et reliées hydrauliquement aux premières constitue un autre obstacle physique limitant l'extraction d'eau douce souterraine. En effet, la remontée d'eau saline ou saumâtre compromet généralement l'extraction d'eau douce souterraine dans de telles zones (souvent dans les zones côtières).

Figure 8

Zones d'eaux souterraines vulnérables à l'intrusion d'eau de mer et à l'élévation du niveau de la mer

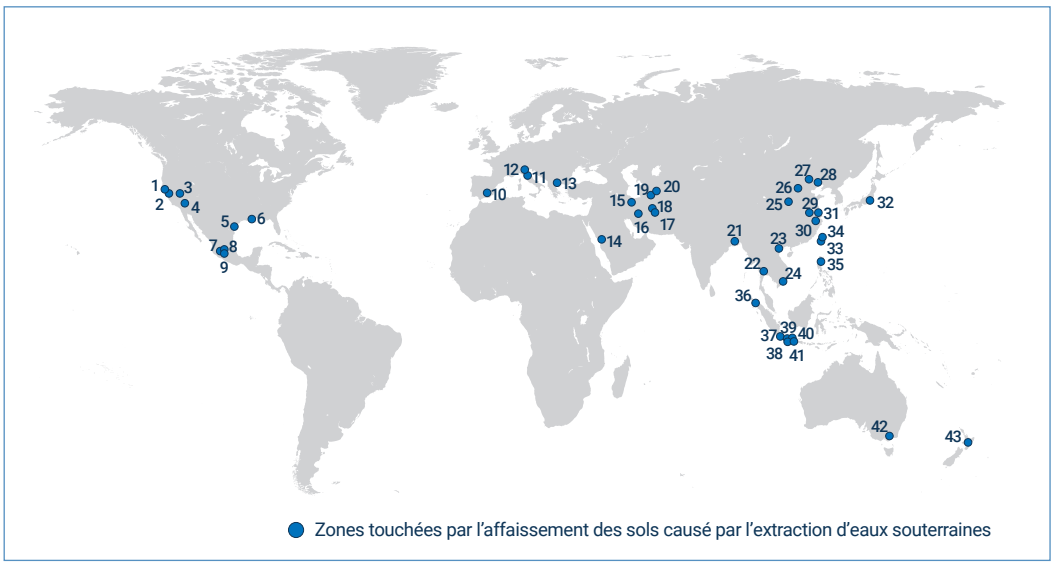


Source : à partir d'Oude Essink et al. (2010, fig. 1, p. 2).

Enfin, les écosystèmes dépendant des eaux souterraines et les couches sédimentaires compressibles peu profondes reliées hydrauliquement aux aquifères font également partie des composantes de l'environnement naturel qui peuvent faire obstacle au prélèvement des eaux souterraines, si l'on veut éviter la dégradation des écosystèmes et l'affaissement des sols. La figure 9 met en évidence les zones à risque touchées par l'affaissement des sols causé par l'extraction d'eaux souterraines dans le monde.

Figure 9

Zones à risque touchées par l'affaissement des sols causé par l'extraction d'eaux souterraines dans le monde



Source : basé sur Guzy et Malinowska (2020, fig. 1, p. 4).

Note : États-Unis d'Amérique : 1. Vallée de Santa Clara ; 2. Vallée de San Joaquin ; 3. Las Vegas ; 4. Bassin d'Eloy ; 5. Houston ; 6. Nouvelle-Orléans. Mexique : 7. Celaya ; 8. Zamora de Hidalgo ; 9. Mexico. Espagne : 10. Lorca. Italie : 11. Ravenne ; 12. Venise. Grèce : 13. Région de Thessalonique. Arabie saoudite : 14. Wadi Al-Yutama. Iran : 15. Téhéran ; 16. Yazd ; 17. Rafsandjan ; 18. Zarand ; 19. Kachmar ; 20. Machhad. Inde : 21. Calcutta. Thaïlande : 22. Bangkok. Viet Nam : 23. Hanoï ; 24. Hô Chi Minh-Ville. Chine : 25. Xi'an ; 26. Taiyuan ; 27. Beijing ; 28. Tianjin ; 29. Su-Xi-Chang ; 30. Hangzhou-Jiaxing-Huzhou ; 31. Shanghai. Japon : 32. Tokyo. Province chinoise de Taiwan : 33. Yunlin ; 34. Taipei. Philippines : 35. Manille. Indonésie : 36. Medan ; 37. Jakarta ; 38. Bandung ; 39. Blanakan ; 40. Pekalongan ; 41. Semarang. Australie : 42. Vallée Latrobe. Nouvelle-Zélande : 43. Wairakei.

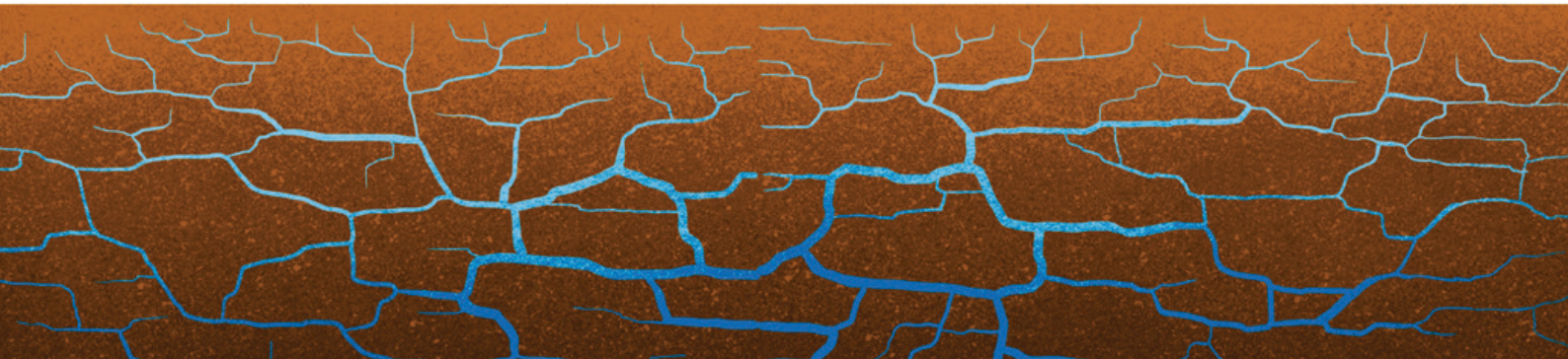
Chapitre 1

Introduction

WWAP
Michela Miletto, Jac van der Gun et Richard Connor

UNESCO-PHI
Dan Lapworth*, Abhijit Mukherjee et Alice Aureli

* Affilié au Service géologique britannique



1.1 Objectif et périmètre du présent rapport

La présente édition du *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau* (WWDR 2022) vise à porter un éclairage sur les eaux souterraines, en attirant l'attention sur leurs rôles spécifiques ainsi que sur les défis et les opportunités qu'elles présentent dans le contexte de la mise en valeur, de la gestion et de la gouvernance des ressources en eau dans le monde.

Les eaux souterraines — qui constituent près de 99 % de toutes les réserves en eau douce liquide de la planète (Shiklomanov et Rodda, 2003) — offrent aux sociétés de nombreuses opportunités susceptibles de leur apporter des avantages sociaux, économiques et environnementaux, notamment au travers de leur contribution à l'adaptation au changement climatique et à la réalisation des objectifs de développement durable (ODD). Les eaux souterraines contribuent à répondre aux demandes en eau de façon considérable. Elles fournissent 49 % de la quantité d'eau prélevée pour un usage domestique par la population mondiale (Aquastat, n.d. ; Margat et Van der Gun, 2013) et environ 25 % de toute l'eau prélevée à des fins d'irrigation, alimentant ainsi 38 % des terres irriguées dans le monde (Aquastat, n.d. ; Margat et Van der Gun, 2013 ; Siebert et al., 2013). Pourtant, malgré son importance capitale, cette ressource naturelle reste mal comprise et, par conséquent, sous-évaluée, mal gérée, voire gaspillée. Dans un contexte marqué par une pénurie croissante des ressources en eau dans de nombreuses régions du monde, il devient urgent de reconnaître l'immense potentiel des eaux souterraines et la nécessité de les gérer prudemment.

Les eaux souterraines constituent près de 99 % de toutes les réserves en eau douce liquide de la planète

Les eaux souterraines sont étroitement connectées à de nombreux autres composants de l'environnement physique de la Terre avec lesquels elles interagissent. On peut observer ce phénomène dans le cycle de l'eau au cours duquel l'eau présente dans l'atmosphère et les eaux de surface devient, après s'être infiltrée dans le sous-sol, une eau souterraine qui, à son tour, se déversera tôt ou tard dans une masse d'eau de surface ou dans la mer, ou retournera dans l'atmosphère par évaporation. Des transformations similaires se produisent le long de la chaîne d'utilisation de l'eau, branche parallèle et anthropique du cycle de l'eau : lorsque des eaux souterraines ou des eaux de surface sont prélevées, cette eau brute est parfois traitée pour être transformée en eau souterraine potable ; elle est alors fournie aux utilisateurs et sa part non consommée deviendra eau usée qui sera rejetée — après traitement ou non — dans les systèmes d'eaux souterraines ou d'eaux de surface. Les eaux souterraines participent également à de nombreux autres cycles et processus naturels, et elles jouent un rôle majeur dans le maintien de la santé humaine, des moyens de subsistance, du développement économique et des écosystèmes. La conscience de ces relations a conduit à la conviction largement répandue qu'il faut que la mise en valeur et la gestion des eaux souterraines aient lieu dans le cadre d'approches intégrées. Toutefois, il ne faut pas pour autant ignorer la nécessité de comprendre correctement les aspects particuliers des eaux souterraines et des processus auxquels elles participent. C'est à cette compréhension que le présent rapport entend contribuer.

Ce premier chapitre présente les concepts et les termes fondamentaux relatifs aux eaux souterraines et aux aquifères[2] dans le contexte des perspectives et initiatives mondiales, tout comme il donne un aperçu des principaux défis et opportunités liés aux eaux souterraines. Le chapitre 2 aborde les aspects juridiques et d'autres aspects institutionnels de la gouvernance des eaux souterraines. Les chapitres suivants traitent des eaux souterraines sous l'angle des trois principaux secteurs d'utilisation de l'eau dans nos sociétés — l'agriculture (chapitre 3), les établissements humains (chapitre 4) et l'industrie (chapitre 5) —, de leurs interactions avec les écosystèmes (chapitre 6) et de leur relation au changement climatique (chapitre 7). Le chapitre 8 aborde les relations de cinq régions du monde aux eaux souterraines. Enfin, les possibilités d'actions sont décrites et examinées du point de vue du renforcement des connaissances (chapitre 9), des politiques et de la planification (chapitre 10), de la gestion des eaux souterraines (chapitre 11), des ressources des aquifères transfrontaliers (chapitre 12) et du financement (chapitre 13). Dans sa conclusion, le rapport envisage les manières de progresser dans l'exploitation, l'utilisation, la gestion et la protection durables des ressources en eaux souterraines ainsi que dans la création de conditions qui y soient propices (chapitre 14).

[2] Pour une définition et une description des aquifères, se reporter à la section 1.3.

1.2 Propriétés uniques et caractéristiques des eaux souterraines et de leurs systèmes

1.2.1 Les eaux souterraines

Il est fréquent de penser que le terme « eaux souterraines » désigne toutes les eaux qui se trouvent dans les sous-sols. Les hydrogéologues et les hydrologues font toutefois une distinction entre les eaux souterraines appartenant à la zone saturée (où tous les interstices sont complètement remplis d'eau) et celles appartenant à la zone non saturée (où les interstices contiennent à la fois de l'eau et de l'air). Ils emploient le terme « eaux souterraines » dans le premier cas et ainsi désignent l'eau située sous la surface de la nappe[3]. C'est cette définition plus limitée que nous avons retenue dans la suite du présent rapport.

1.2.2 Propriétés uniques et caractéristiques connexes

Les eaux souterraines sont étroitement connectées aux eaux de surface et interagissent avec elles. Dans de nombreux cas d'utilisations par les êtres humains, chacune peut remplacer l'autre. Néanmoins, certaines propriétés et caractéristiques distinguent nettement les systèmes d'eaux souterraines (voir encadré 1.1) des systèmes d'eaux de surface :

- Les eaux souterraines sont présentes dans les *pores, fissures et autres interstices au sein des formations géologiques* et ne sauraient exister sans cette matrice géologique.
- Les eaux souterraines sont *invisibles*, cachées aux regards.
- Les eaux souterraines constituent une ressource distribuée spatialement. Elles sont pratiquement omniprésentes et s'étendent latéralement sous la majeure partie de la surface terrestre, contrairement aux eaux de surface qui circulent dans des cours d'eau et des lacs ne couvrant qu'une infime partie des zones terrestres.
- Les nappes d'eaux souterraines se déploient sur de grandes étendues latérales mais possèdent aussi une *dimension verticale considérable* (géométrie 3D). Elles peuvent s'étendre verticalement depuis le dessous de la surface du sol jusqu'à de grandes profondeurs, parfois des milliers de mètres.
- Les eaux souterraines *se déplacent généralement très lentement*, principalement en raison du fait que la matrice géologique souterraine offre une résistance hydraulique à l'écoulement d'une magnitude bien plus grande que la résistance hydraulique propre à un écoulement à surface libre. Cependant, les eaux souterraines peuvent s'écouler de manière assez rapide dans les formations karstiques.
- *De larges volumes d'eaux souterraines sont stockés* dans les sous-sols et sont, en moyenne, deux fois plus élevés que les volumes annuels de reconstitution des nappes.

Encadré 1.1 Les systèmes d'eaux souterraines

Le terme générique « système d'eaux souterraines » peut faire référence à différentes représentations conceptuelles de portions tridimensionnelles spécifiques de la partie saturée du sous-sol. Les plus connues ont trait aux concepts d'*aquifères* et de *systèmes aquifères*, identifiés et délimités à partir des différences de propriétés hydrauliques notables avec les zones adjacentes du sous-sol. On en trouvera une définition et une étude plus détaillées dans la section 1.3. Citons également les *segments souterrains des bassins fluviaux* (délimités par les lignes de partage des eaux souterraines), les *systèmes d'écoulement des eaux souterraines* tels que définis par Tóth (1963) et les *masses d'eaux souterraines* telles que décrites par l'Union européenne dans sa Directive-cadre sur l'eau (Parlement européen/Conseil de l'Union européenne, 2006 ; Commission européenne, 2008). La délimitation de ces dernières ne suit pas à une méthodologie standard mais a notamment recours au critère de la juridiction sur les eaux souterraines. Bien que les concepts évoqués correspondent à une simplification de la réalité, ils facilitent l'analyse et la compréhension de l'état des eaux souterraines, des processus qui leur sont afférents et des interactions que celles-ci ont avec les populations, les écosystèmes et d'autres systèmes externes (voir également la figure 1.1).

[3] Ce qui suppose une pression hydrostatique égale ou supérieure à la pression atmosphérique locale.

Encadré 1.2 Qu'est-ce qu'un aquifère ?

Un aquifère est une formation géologique perméable saturée, qui peut permettre l'écoulement d'importantes quantités d'eau dans des conditions de gradients hydrauliques ordinaires (Freeze et Cherry, 1979).

Du fait des propriétés uniques citées précédemment, les systèmes d'eaux souterraines présentent bien souvent les caractéristiques suivantes :

- Ils sont facilement et *librement accessibles* à de nombreuses personnes, ce qui les apparente à un *bien commun*.
- Ils sont souvent *méconnus* et mal compris, même par la population locale.
- Les activités d'exploration, d'évaluation et de surveillance sont *difficiles et/ou coûteuses*. Ceci entrave l'acquisition d'un savoir sur les systèmes d'eaux souterraines locaux suffisamment précis, savoir nécessaire à l'identification et à l'analyse appropriées des opportunités et des défis ainsi qu'à l'élaboration de solutions potentielles.
- Les grands volumes d'eaux souterraines stockées (réserves d'eaux souterraines) forment d'*immenses réservoirs d'eau tampons*, assurant une disponibilité permanente de l'eau dans de nombreuses régions où les saisons sèches sont très marquées et où les cours d'eau ne coulent que de manière intermittente ou saisonnière.
- Au sein d'un même grand système d'eaux souterraines, l'*âge des eaux souterraines* varie souvent de manière considérable (allant de peu de temps à plusieurs dizaines de millénaires) tout comme la salinité et d'autres paramètres qualitatifs peuvent subir d'*importantes variations*.
- Au fil du temps, la *qualité des eaux souterraines* peut changer du fait de la durée de séjour et du contact avec la matrice géologique et la biosphère souterraine.
- Comparés aux systèmes d'eaux de surface, les systèmes d'eaux souterraines bénéficient, en règle générale, d'une *meilleure protection contre la pollution* (en raison de la résistance à l'écoulement du mort-terrain) mais une fois pollués, ils sont beaucoup plus difficiles à assainir. Les systèmes d'eaux souterraines peu profonds sont plus exposés aux risques de pollution que les plus profonds.

1.3 Les aquifères : principales caractéristiques et ressources en eaux souterraines

1.3.1 Les aquifères, des unités spatiales définies par la subdivision hydraulique du sous-sol

Les formations géologiques qui composent les sous-sols — roches sédimentaires, ignées et métamorphiques — présentent une variation presque infinie de propriétés. La catégorie des propriétés hydrauliques est la plus pertinente pour comprendre les phénomènes d'écoulement et de stockage des eaux souterraines. Ainsi, les hydrogéologues étudient généralement le sous-sol selon des critères hydrauliques et le divisent schématiquement en unités spatiales qui diffèrent les unes des autres selon leur capacité de stockage (due à leur porosité totale ou efficace, ou à leur indice des vides) et de diffusion (en fonction de leur perméabilité ou de leur conductivité hydraulique) des eaux souterraines. Les unités spatiales dont ces deux capacités sont élevées sont appelées des *aquifères* ; elles jouent à la fois le rôle de réservoir et de « passage rapide » pour les eaux souterraines.

D'autres définitions du terme *aquifère* peuvent être trouvées dans des manuels et autres publications. Elles traduisent des divergences de point de vue (selon que l'on considère l'aquifère comme une source d'approvisionnement en eau ou comme un écoulement souterrain « neutre »). Certaines définitions semblent même attribuer le nom d'aquifère exclusivement, ou principalement, à la matrice géologique (le contenant) plutôt qu'aux eaux souterraines qui se trouvent dans ses interstices (le contenu). L'encadré 1.2 fournit une définition simple, pertinente et compatible avec l'approche de la plupart des experts en eaux souterraines.

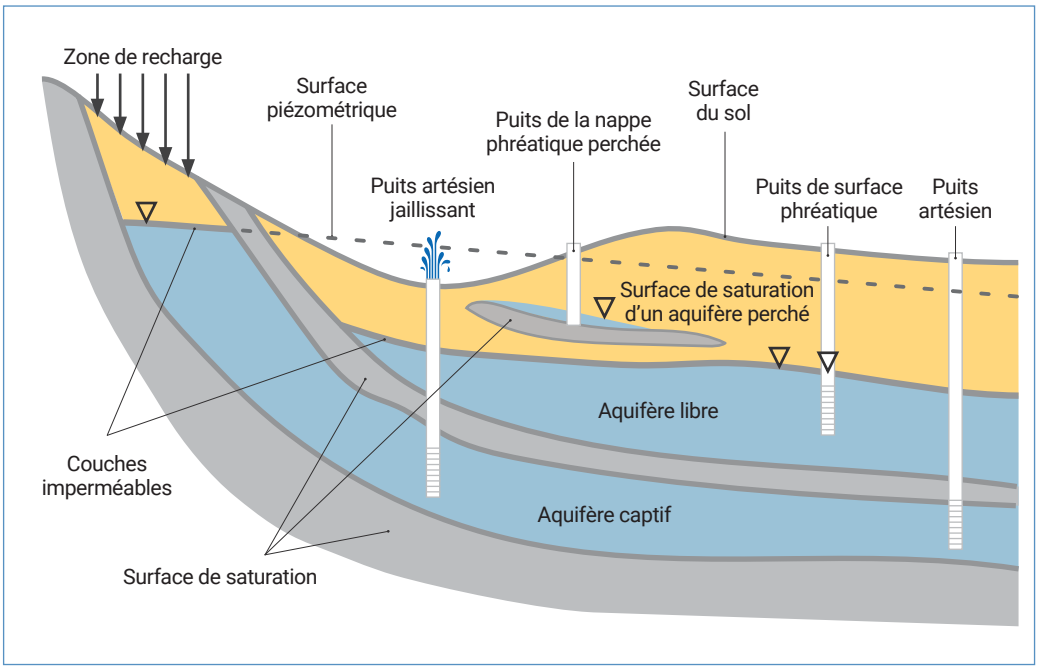
Il est souvent difficile de déterminer les limites d'un aquifère, en particulier si celui-ci possède des caractéristiques géologiques hétérogènes, s'il est étendu ou se trouve à une très grande profondeur. Pour ce faire, il faut l'intervention d'hydrogéologues compétents, capables d'interpréter correctement la structure, la continuité et les propriétés de formations géologiques souterraines qui n'ont été observées en général que dans peu d'endroits.

1.3.2 Les autres unités hydrauliques du sous-sol

Les aquifères interagissent avec d'autres unités hydrauliques souterraines, en particulier avec la zone non saturée et les aquitards (voir définition ci-dessous). La figure 1.1 présente une coupe verticale hypothétique sur laquelle sont représentés les aquifères et d'autres unités hydrauliques souterraines.

Figure 1.1

Coupe verticale représentant les aquifères, les couches imperméables et la zone non saturée



Source : basé sur Harlan et al. (1989, p. 9).

Il est souvent difficile de déterminer les limites d'un aquifère, en particulier si celui-ci possède des caractéristiques géologiques hétérogènes, s'il est étendu ou se trouve à une très grande profondeur

La *zone non saturée* s'étend de la surface du sol jusqu'à la surface de la nappe. Les interstices (pores ou fissures) qui se trouvent dans cette zone ne contiennent pas seulement de l'eau mais aussi de l'air. La pression de l'eau contenue dans la zone non saturée est inférieure à la pression atmosphérique, en raison des forces de succion de la matrice, ce qui influence son comportement hydraulique. La zone non saturée contribue à la recharge des nappes souterraines en laissant passer les précipitations excédentaires ou les eaux de surface du sol vers la zone saturée. Dans les zones où la surface de la nappe se trouve à faible profondeur, elle facilite le flux ascendant lorsque les eaux souterraines sont évacuées directement dans l'atmosphère par évaporation ou évapotranspiration.

Les *aquitards* sont des formations souterraines qui contiennent des volumes d'eau non négligeables mais qui n'ont pas la capacité de transmettre ces volumes vers les puits. Moins perméables que les aquifères, ils peuvent toutefois, à l'échelle régionale, laisser passer l'eau en quantité significative vers les aquifères adjacents ou les aquifères qu'ils séparent. D'un point de vue hydraulique, les aquitards fonctionnent comme des couches encaissantes ou semi-encaissantes.

Les autres unités géologiques souterraines ne présentent pas d'activité hydraulique et constituent des obstacles à l'écoulement des eaux souterraines, soit en raison de leur perméabilité très faible, soit en raison de l'absence d'interstices interconnectés. Pour désigner ces éléments imperméables, on utilise les termes quelque peu désuets d'*aquicludes* et d'*aquifuges*.

1.3.3 Les différents types d'aquifères

Il existe plusieurs types d'aquifères qui peuvent être classés selon différents critères tels que :

- La *taille* : l'étendue des aquifères varie de moins de cent à plus d'un million de km² tandis que leur épaisseur va de moins de dix mètres à plus de mille mètres.
- La *géologie* : les aquifères les plus productifs sont constitués de sable et de gravier (formation non consolidée), de grès (formation consolidée), de calcaires karstiques ou de certaines roches volcaniques (comme le basalte) ; la roche-mère érodée peut former des aquifères locaux, généralement moins productifs.
- Les *volumes stockés (réserves)* : les aquifères sédimentaires épais et poreux contiennent de plus grands volumes d'eaux souterraines que les aquifères rocheux fissurés.
- L'*emplacement par rapport à la surface terrestre* : les aquifères peu profonds (dont la limite supérieure se situe à moins de quelques dizaines de mètres de profondeur) sont susceptibles de participer plus activement au cycle de l'eau que les aquifères moyennement profonds ou très profonds ; en outre, plus la profondeur augmente, plus l'extraction d'eaux souterraines devient coûteuse et difficile sur le plan technique.
- Le caractère *libre ou captif* : les aquifères libres possèdent une surface libre qui se déplace verticalement en fonction des fluctuations des volumes de stockage alors que dans les aquifères captifs, il n'y a aucune surface libre, étant donné que la pression hydraulique sous la couche encaissante supérieure excède partout la pression atmosphérique. Dans les aquifères captifs, la fluctuation du stockage est sans rapport avec une modification du niveau de la surface, mais elle est associée à des réactions d'élasticité de l'eau stockée et de la matrice solide lors des changements de pression.
- Les *conditions de la recharge* : de nombreux aquifères reçoivent une recharge abondante (des centaines de millimètres par an) et contiennent donc des ressources en eaux souterraines renouvelables ; d'autres (principalement dans les zones arides ou de pergélisol) ne bénéficient pas d'une recharge suffisante ; l'eau qu'ils contiennent est donc considérée comme non renouvelable.
- Le caractère *national ou transfrontière* : les aquifères nationaux sont entièrement situés à l'intérieur d'une seule et même juridiction (nationale ou infranationale) alors que les aquifères traversés par des frontières nationales ou d'autres juridictions sont dits transfrontaliers.

En règle générale, on attribue un nom aux aquifères importants afin de faciliter leur identification et la communication à leur sujet.

Les activités humaines, telles que l'extraction d'eaux souterraines et la recharge artificielle, modifient le bilan hydrique de l'aquifère

1.3.4 Le régime hydrologique d'un aquifère

En vertu du principe de conservation de la masse, la recharge des eaux souterraines est toujours compensée par les écoulements d'eau et par la fluctuation des réserves. Par conséquent, les activités humaines, telles que l'extraction d'eaux souterraines et la recharge artificielle, modifient le bilan hydrique : la première entraîne une réduction des rejets naturels et/ou des réserves d'eaux souterraines ; la seconde a l'effet inverse.

1.3.5 Systèmes aquifères

En fonction des conditions spécifiques à une zone et de l'échelle utilisée pour les recherches ou la cartographie, plusieurs aquifères superposés et séparés par des aquitards peuvent constituer ce que l'on appelle un *système aquifère*, à condition qu'ils fassent partie d'un système continu d'un point de vue hydraulique. Si, en considérant la figure 1.1, la couche encaissante qui sépare les deux aquifères laisse passer de l'eau (et constitue donc un aquitard), il existe alors une connectivité hydraulique entre les deux aquifères, ce qui signifie qu'avec l'aquitard, ils forment un système aquifère. Dans la pratique, la distinction entre aquifères et systèmes aquifères est quelque peu arbitraire dans la mesure où faire une distinction entre aquitards et lentilles peu perméables, ainsi qu'entre roches perméables et peu perméables, relève de la subjectivité. Plus la formation géologique est grande et

complexe, plus on tend à utiliser le terme de « système aquifère » pour la décrire. Les plus grands systèmes aquifères du monde, situés dans des bassins sédimentaires profonds, s'étendent sur quelques millions de kilomètres carrés et atteignent plusieurs milliers de mètres de profondeur. Les parties les plus profondes de la plupart de ces systèmes aquifères contiennent de l'eau salée.

1.4 Petit historique de l'exploitation des eaux souterraines

Les humains extraient et utilisent les eaux souterraines depuis des temps immémoriaux. Pendant longtemps, ils ont dû se contenter de prélever l'eau provenant de sources et de puits peu profonds, creusés à la main, dont on tirait l'eau en employant la force physique des animaux ou des hommes. Au fil du temps, des techniques ont été élaborées afin d'utiliser cette énergie le plus efficacement possible, notamment le *shaduf* (l'ancêtre de la pompe manuelle), la *saqiyah* (une roue perse modifiée à traction animale) et l'*arhor* (Margat et Van der Gun, 2013 ; Yannopoulos et al., 2015). Si ces techniques ont contribué au développement, à petite échelle, d'une irrigation alimentée par les eaux souterraines, les taux d'extraction restaient encore faibles à ce stade.

L'invention, entre 1 000 et 800 ans avant J.-C., du système des *qanats* et sa mise en place ont permis de franchir une étape capitale. Ce système de tunnels permet d'extraire les eaux souterraines peu profondes et de les transporter, sous l'effet de la gravité, sans qu'il soit nécessaire de recourir à une énergie externe pour les faire remonter à la surface. Les *qanats* seraient originaires du nord-ouest de l'Iran et, de là, se seraient développés au Moyen-Orient, en Afrique du Nord et en Europe méridionale, mais on en trouve également en Asie centrale, en Chine occidentale et en Amérique du Sud (English, 1968 ; Mostafaeipour, 2010). Dans les régions arides, ils ont joué — et continuent dans certains pays de jouer — un rôle essentiel pour l'irrigation et pour les établissements humains.

Les humains extraient et utilisent les eaux souterraines depuis des temps immémoriaux

Les moulins à vent sont une autre technique ancestrale qui permet d'extraire l'eau en économisant de l'énergie : même si l'on ne sait pas depuis quand ils sont en usage pour pomper les eaux souterraines, il est fort probable que leur utilisation remonte au Moyen Âge, voire à une époque antérieure. Aujourd'hui, ils sont encore utilisés, notamment pour abreuver le bétail et irriguer de petites surfaces (Yannopoulos et al., 2015 ; Glazema, 2003).

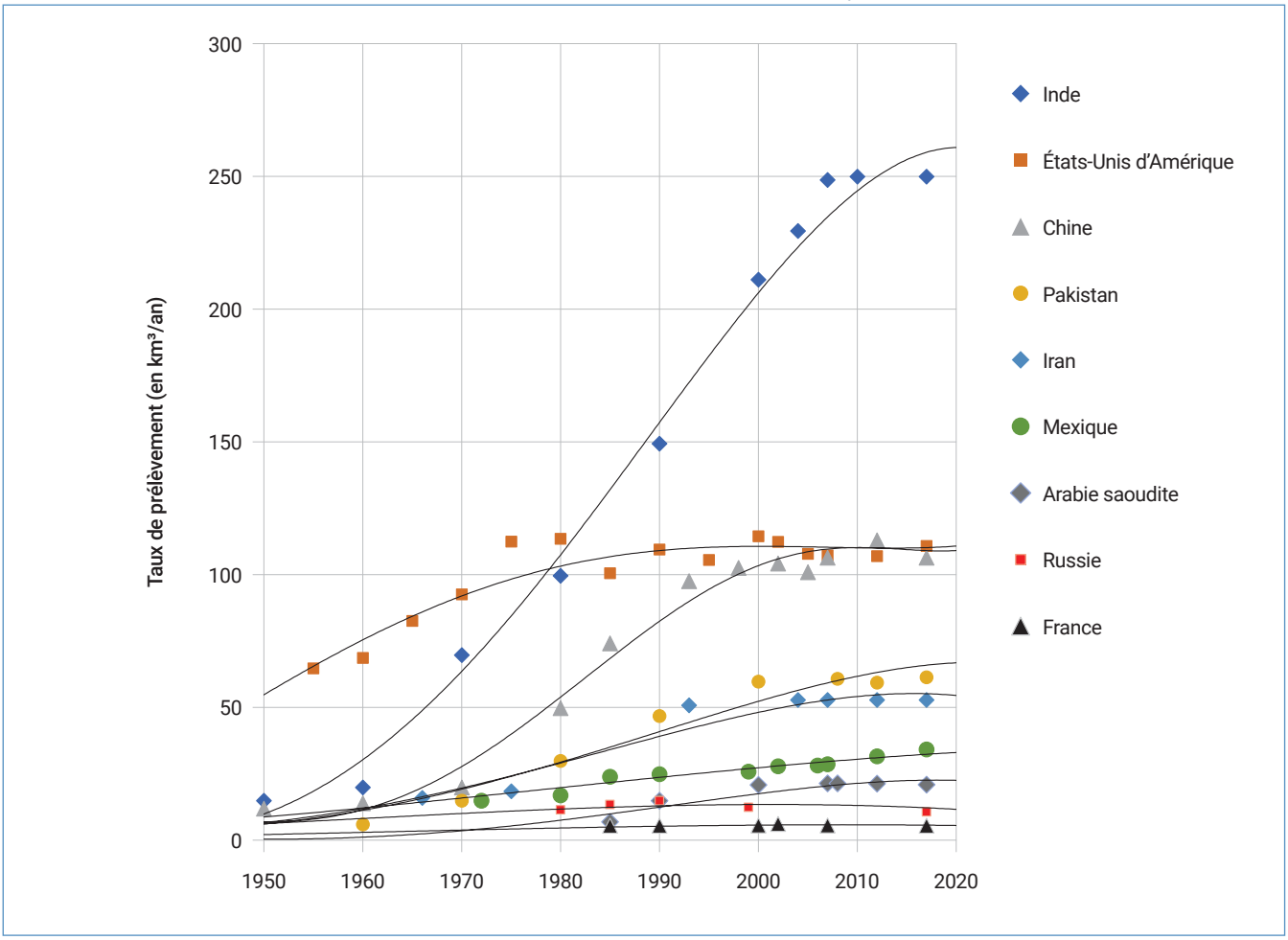
Bien que des techniques de forage à percussion aient été développées en Chine, il y a déjà mille ans, pour l'exploitation des saumures profondes (Kuhn, 2004 ; Han et Cheng, 2013), les excavations sont restées, jusqu'à récemment, la technique la plus courante pour construire des puits à travers le monde. Les extractions d'eaux souterraines sont ainsi longtemps restées limitées à des profondeurs relativement faibles. À partir du début du XIXe siècle, la mise au point de techniques de forage pour les puits marqua une évolution majeure, mais il fallut attendre encore longtemps avant que celles-ci soient suffisamment avancées et opérationnelles partout dans le monde. Ces techniques ont ouvert la voie à l'exploration et à l'exploitation des aquifères plus profonds, et furent aussi essentielles pour la découverte des zones aquifères artésiennes propices à la construction de puits jaillissants. Au début du XXe siècle, l'apparition de pompes motorisées de grande capacité, pouvant pomper les eaux souterraines situées en profondeur, a entraîné une augmentation sans précédent des extractions et a permis de répondre à une demande en eau sans cesse croissante. Par conséquent, les extractions d'eaux souterraines ont grimpé en flèche tout au long du XXe siècle, d'abord aux États-Unis, au Mexique et dans plusieurs pays européens au cours des premières décennies, puis dans la plupart des autres pays du monde lors de la seconde moitié du siècle.

La figure 1.2 montre l'évolution des extractions d'eaux souterraines au cours de la période 1950-2020 dans plusieurs pays (il s'agit de pays pour lesquels on dispose de données suffisantes). On y voit clairement que les États-Unis et les pays d'Asie comme l'Inde, la Chine, le Pakistan et l'Iran n'ont pas atteint leur pic de prélèvement au même moment. En 2017, les extractions d'eaux souterraines dans le monde ont été estimées à 959 km³ (voir Prologue) dont 68 % sont attribués aux neuf pays présentés sur la figure 1.2. En supposant que les autres pays

du monde aient suivi la même évolution en moyenne, les extractions d'eaux souterraines dans le monde n'étaient que de 158 km³/an en 1950 et ont augmenté au cours des décennies selon les pourcentages moyens annuels suivants : +3,7 % pour 1950-1960, +4,8 % pour 1960-1970, +3,9 % pour 1970-1980, +3,4 % pour 1980-1990, +1,8 % pour 1990-2000, +0,8 % pour 2000-2010 et -0,2 % pour 2010-2017. Les eaux souterraines représentaient 12 % de toute l'eau douce prélevée en 1950 contre 25 % en 2017. On observe notamment que les taux d'extraction se sont plus ou moins stabilisés aux États-Unis, dans la plupart des pays européens et en Chine.

Les utilisations, les avantages et les défis relatifs à l'emploi d'eaux souterraines dans les secteurs agricole, domestique et industriel sont décrits aux chapitres 3, 4 et 5 respectivement.

Figure 1.2 Évolution des extractions totales d'eaux souterraines dans plusieurs pays, 1950–2020



Source : basé sur Margat et Van der Gun (2013, fig. 5.4, p. 128). Mis à jour par le dernier auteur en utilisant les données nationales.

1.5 Quels services offrent les eaux souterraines aux humains et aux écosystèmes ?

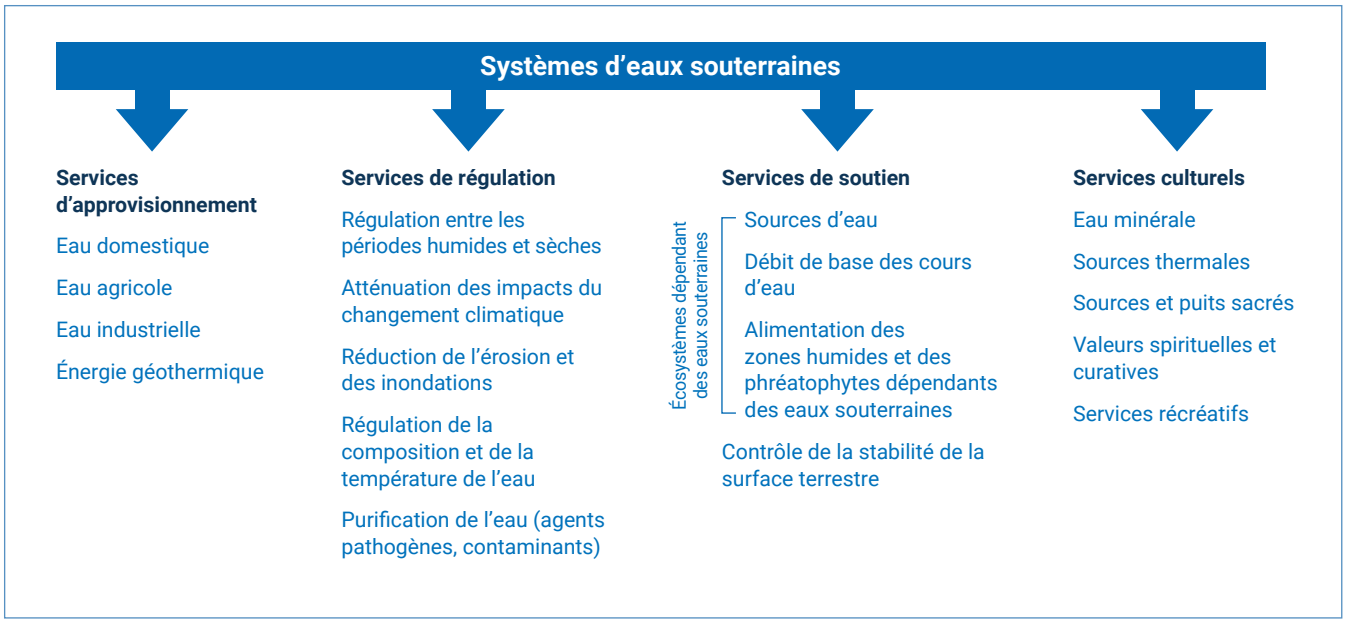
Pour aussi importante qu'elle soit, l'extraction d'eaux souterraines aux fins des activités humaines ne relève que d'une seule catégorie de services parmi tous ceux qu'offrent ces systèmes (services d'approvisionnement). Il faut garder à l'esprit que les eaux souterraines offrent bien d'autres services comme l'indique la figure 1.3. La plupart des services présentés dans cette figure paraissent évidents, mais il convient de formuler quelques explications à leur sujet.

- Les *services d'approvisionnement* permettent d'extraire les eaux souterraines pour les utiliser mais dans certains cas, ce prélèvement ne sert qu'à obtenir l'énergie géothermique que celles-ci contiennent, après quoi l'eau prélevée est renvoyée dans le sous-sol.
- Les *services de régulation* sont des services fournis *in-situ*, qui reflètent la capacité tampon des aquifères (voir section 1.2). Ils consistent surtout à réguler les régimes quantitatifs et qualitatifs des systèmes d'eaux souterraines.

- Les *services de soutien* sont aussi des services *in-situ* ; ils bénéficient aux écosystèmes dépendant des eaux souterraines (GDE) et à d'autres éléments environnementaux en relation avec les eaux souterraines. Outre les aquifères, les aquitards peuvent aussi avoir un rôle non négligeable dans cette catégorie, parfois même un rôle essentiel (comme le contrôle de l'affaissement des sols).
- Enfin, les eaux souterraines fournissent aussi des *services culturels* en lien avec les loisirs, les traditions, les religions ou les valeurs spirituelles, qui sont associés à des sites particuliers plutôt qu'à des aquifères. En effet, les eaux souterraines ont occupé une place prépondérante dans les cultures et les religions du monde entier, comme en témoignent les grottes et les sources vénérées par les peuples mayas du Mexique ou les puits du dragon et sources sacrées en Chine (Ray, 2020).

Il arrive que les services d'approvisionnement entrent en conflit avec les services de soutien ; en effet, ces derniers sont souvent affaiblis par les prélèvements intensifs d'eaux souterraines. Il faut que la gouvernance et la gestion des eaux souterraines visent la recherche d'un équilibre optimal entre les services conflictuels ou concurrents.

Figure 1.3 Les nombreux services offerts par les systèmes d'eaux souterraines



Source : basé sur Van der Gun (2019, fig. 5).

1.6 Interconnexions mondiales

Les eaux souterraines constituent d'abord une ressource locale que les spécialistes appréhendent généralement au sein d'un contexte local. Néanmoins, elles sont étroitement liées à leur environnement à différentes échelles, ce qui nécessite d'adopter des approches différentes pour examiner et traiter l'ensemble des problèmes qui peuvent se poser. Si l'approche locale est importante, il faut aussi tenir compte des situations à l'échelle de l'aquifère ainsi qu'aux niveaux national, transfrontalier, régional et mondial. On trouvera ci-dessous un aperçu de certaines interconnexions mondiales clés concernant les eaux souterraines.

1.6.1 Dans le cycle global de l'eau, les eaux souterraines sont en interaction avec le climat et d'autres systèmes mondiaux

Grâce à leurs caractéristiques spécifiques, notamment leur capacité tampon, les eaux souterraines apportent leur contribution particulière au cycle global de l'eau. Toutefois, le cycle global de l'eau et son bilan hydrique ne sont pas en équilibre dynamique : ils subissent les effets du changement climatique et des interventions humaines telles que le prélèvement

des eaux souterraines et les pratiques d'emploi des sols, dont l'ampleur ne cesse de croître. En principe, cette interaction s'effectue dans les deux sens, ce qui signifie que toute modification du cycle de l'eau entraînera également des répercussions sur le climat mondial. Ces dernières décennies, des progrès considérables ont été réalisés dans l'évaluation et la compréhension de ces modifications à l'échelle mondiale et de leurs répercussions. Une nouvelle discipline a vu le jour : l'hydrologie mondiale. Elle utilise des modèles hydrologiques au niveau mondial, associés à des modèles climatiques, des modèles d'emploi des sols ou d'utilisation des ressources en eau, afin d'explorer les dynamiques et processus hydrologiques à grande échelle, et obtenir une meilleure compréhension du système terrestre. Il est à prévoir que cette discipline s'associe à d'autres (sécurité alimentaire, économie, énergie et biodiversité) (Bierkens, 2015).

L'extraction intensive des eaux souterraines entraîne une diminution des réserves d'eau situées sur ou dans les sols, ce qui produit une augmentation presque égale du volume d'eau dans les océans

1.6.2 Les eaux souterraines et la résilience du système terrestre

Comme le soulignent Gleeson et al. (2020a), de nombreux processus du cycle global de l'eau contribuent à la régulation du climat et au maintien des écosystèmes. À l'heure actuelle, les activités humaines — notamment l'extraction d'eaux souterraines — perturbent ces processus de manière significative et risquent de provoquer des changements de régime planétaires qui menacent l'équilibre de notre planète, grâce auquel des habitats propices aux humains et aux écosystèmes peuvent exister. Il est donc essentiel d'étudier la résilience de notre planète à de tels bouleversements de régime ainsi que de trouver des moyens de les contrôler.

1.6.3 Les eaux souterraines et l'élévation du niveau de la mer

L'extraction intensive des eaux souterraines entraîne une diminution des réserves d'eau situées sur ou dans les sols, ce qui produit une augmentation presque égale du volume d'eau dans les océans. Bien que les estimations relatives à la contribution des extractions d'eaux souterraines à l'élévation annuelle du niveau des mers diffèrent (Wada et al., 2010, 2016 ; Konikow, 2011 ; Bierkens et Wada, 2019), il ne fait aucun doute que ces extractions contribuent, de manière significative, à cette élévation, soit-elle actuelle ou à venir, en plus de contribuer au changement climatique. L'élévation du niveau de la mer a pour principal impact de provoquer des inondations côtières, des crues et des intrusions croissantes d'eau salée.

1.6.4 La dégradation des écosystèmes dépendant des eaux souterraines à l'échelle mondiale

Les écosystèmes dépendant des eaux souterraines sont particulièrement vulnérables aux extractions intensives d'eaux souterraines. Par conséquent, l'augmentation continue des extractions d'eaux souterraines dans le monde se traduit par une diminution globale des débits de base, des sources, des flux artésiens et des zones humides, entraînant une perte de biodiversité et une désertification progressive à long terme (voir chapitre 6).

1.6.5 Les eaux souterraines et le commerce mondial

Le commerce mondial permet de consommer des aliments ou d'autres produits de base dans des endroits très éloignés de leur lieu de production. Selon Hoekstra (2018), 22 % de l'eau utilisée dans le monde sert à fabriquer des produits d'exportation. Par conséquent, d'importants volumes d'« eau virtuelle »[4] voyagent à travers le globe, ce qui signifie qu'un pourcentage variable de l'empreinte hydrique liée à la consommation des pays a lieu hors de leur territoire (l'« empreinte externe »). Bien que le commerce international procure des bénéfices économiques indéniables aux pays exportateurs, les économies d'eau réalisées dans les pays importateurs risquent d'accroître le stress hydrique dans les pays exportateurs. On estime qu'en 2010, l'appauvrissement des eaux souterraines lié à la production alimentaire au niveau mondial équivalait à 141 km³/an, dont 26 km³/an ont servi aux exportations (Dalin et al., 2017).

[4] Le terme « eau virtuelle » a été employé pour la première fois par Allan (1998, 2003) pour désigner l'eau nécessaire à la production de produits agricoles et autres. Le commerce international fait intervenir des flux d'eau virtuelle entre les pays.

1.7 Les eaux souterraines dans le contexte des programmes et accords mondiaux

1.7.1 Le Programme hydrologique intergouvernemental de l'UNESCO

Le Programme hydrologique intergouvernemental (PHI) compte plusieurs réalisations importantes dans le domaine des eaux souterraines, notamment la promotion mondiale de la cartographie hydrogéologique (Gilbrich et Struckmeier, 2014), la mise en place d'une initiative mondiale relative aux aquifères transfrontaliers (Initiative sur la gestion des ressources des aquifères transnationaux ou ISARM), le Programme mondial d'évaluation et de cartographie hydrogéologiques (WHYMAP) et la création du Centre international d'évaluation des ressources en eaux souterraines (IGRAC). Au cours de sa huitième phase (PHI-VIII 2014-2021), le PHI mettra les connaissances scientifiques dont il dispose au service de la sécurité de l'eau.

1.7.2 Le Programme de développement durable à l'horizon 2030

Si une seule cible des ODD fait explicitement référence aux eaux souterraines, pas moins de 53 autres cibles ont un lien avec celles-ci

Les objectifs de développement durable (ODD) sont un appel à l'action de tous les pays — pauvres, riches et à revenu intermédiaire — afin de promouvoir la prospérité tout en protégeant la planète (figure 1.4). Au nombre de dix-sept, les ODD ont été adoptés en 2015, par l'ensemble des États Membres de l'Organisation des Nations Unies, dans le cadre du Programme de développement durable à l'horizon 2030 qui définit un plan sur quinze ans composé de 169 cibles pour réaliser ces objectifs (DESA, n.d.). Si une seule cible des ODD fait explicitement référence aux eaux souterraines (cible 6.6), pas moins de 53 autres cibles ont un lien avec celles-ci. C'est notamment le cas pour toutes les cibles relatives aux ODD 6, 12 et 13. Dans la majorité des cas, on constate une synergie entre l'atteinte de la cible et les tendances, ou aspirations, concernant les eaux souterraines (« liens de renforcement »), mais dans certains cas, leurs relations sont conflictuelles ou présentent un caractère mixte (Guppy et al., 2018). Les eaux souterraines jouent un rôle essentiel dans la réalisation des objectifs du Programme 2030, ce qui nécessite de disposer d'une expertise et de connaissances locales appropriées sur les eaux souterraines pour permettre leur mise en œuvre (Velis et al., 2017 ; AIH, 2017). Il existe de solides arguments en faveur d'une définition de nouveaux « indicateurs de l'état des eaux souterraines » pour plusieurs cibles de l'ODD 6, étant donné que les eaux souterraines en forment une part intégrale, mais n'ont pas, à ce jour, encore été suffisamment prises en compte (AIH, 2017).

Figure 1.4
Les objectifs de développement durable

Source : DESA (n.d.).

1.7.3 Eau, assainissement et hygiène (WASH)

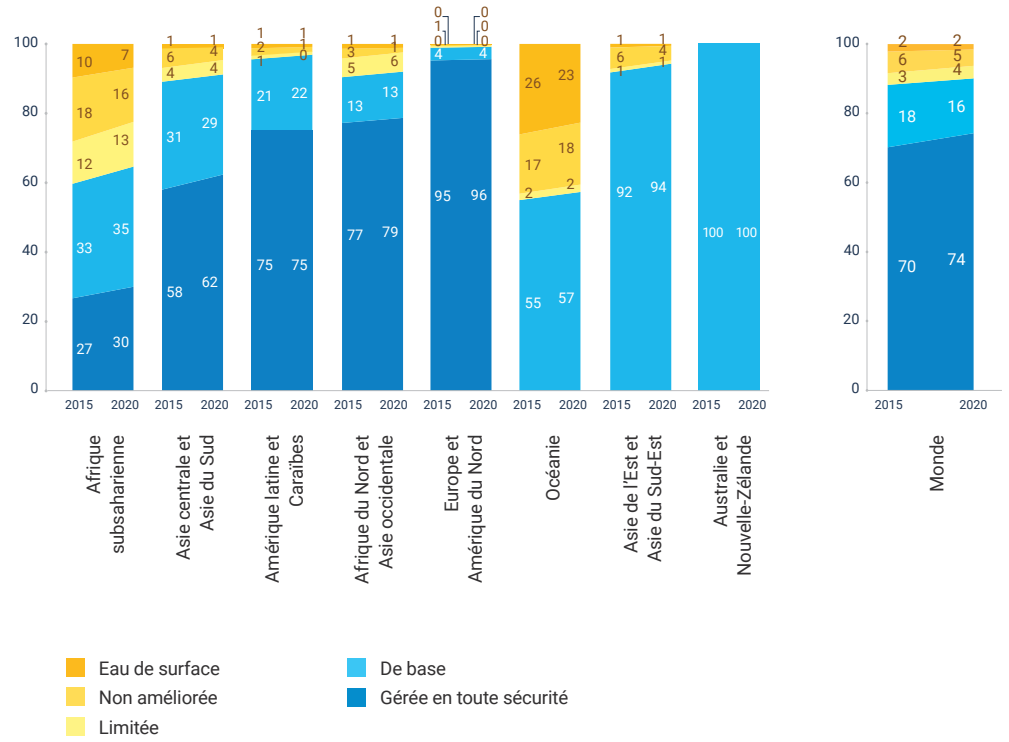
Le suivi de l'amélioration de l'accès à l'eau potable, à l'assainissement et à l'hygiène au niveau mondial relève du mandat de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) et du Fonds des Nations Unies pour l'enfance (UNICEF), en coopération avec de nombreuses autres organisations. Depuis 1990, leur Programme commun de suivi de l'approvisionnement en eau, de l'assainissement et de l'hygiène (JMP) rend compte des progrès réalisés au niveau national, régional et mondial en matière d'accès à l'eau potable, l'assainissement et l'hygiène.

La figure 1.5 présente l'évolution de la distribution d'eau potable aux niveaux régional et mondial au cours de la période 2015-2020. Le pourcentage de la population mondiale utilisant un service d'approvisionnement en eau potable géré de façon sécurisée est passé de 70 % à 74 %, mais les écarts entre et au sein des régions restent considérables. On dispose de statistiques similaires pour les services d'assainissement : le pourcentage de la population mondiale utilisant un service d'assainissement géré de façon sécurisée est passé de 47 % à 53 % au cours de la période 2015-2020. En outre, le JMP indique qu'en 2020, 71 % de la population mondiale disposait d'un moyen élémentaire de se laver les mains à la maison avec du savon et de l'eau (OMS/UNICEF, 2021). De telles installations revêtent une plus grande importance depuis le début de la pandémie de la COVID-19, car il est démontré que le lavage des mains réduit fortement la transmission des virus (Brauer et al., 2020).

Le JMP ne précise pas la part des eaux souterraines dans les services d'eau, d'assainissement et d'hygiène (WASH) et son évolution, mais elle est sans aucun doute considérable.

Figure 1.5

Distribution régionale et mondiale des services d'eau potable, 2015-2020 (%)



Note : En 2020, cinq régions ODD disposaient d'estimations sur la distribution d'eau potable gérée de façon sécurisée.

Source : adapté de OMS/UNICEF (2021, fig. 2 et 3, p. 8).

1.8 Les défis liés aux eaux souterraines

La capacité des systèmes d'eaux souterraines à fournir divers services (comme montré par la figure 1.2) dépend de leurs caractéristiques géographiques (voir Prologue) ainsi que de l'influence dynamique qu'exercent les phénomènes naturels et humains sur ceux-ci. Ces derniers sont à l'origine de nombreux défis liés aux eaux souterraines dans toutes les régions du monde, notamment dans les zones densément peuplées. On trouvera ci-dessous une brève description du type de défis posés. Plusieurs chapitres du présent rapport fournissent de plus amples informations à ce sujet et proposent des solutions potentielles dans un cadre thématique (chapitres 3 à 7), régional (chapitre 8) ou de gouvernance et de gestion (chapitres 10 et 11). Relever ces défis suppose une bonne compréhension de la chaîne causale sous-jacente, qui va des causes profondes (tels la croissance démographique, le développement économique et le changement climatique) aux changements affectant l'état des eaux souterraines (quantité, niveau/pression et qualité), en passant par les contraintes s'exerçant sur elles (tels le prélèvement d'eaux souterraines et l'afflux de polluants) ainsi que leurs impacts sur les humains, les écosystèmes et l'environnement.

1.8.1 Épuisement des réserves d'eaux souterraines à long terme

L'épuisement des réserves d'eaux souterraines, qui s'accompagne d'une baisse de leur niveau, se produit lorsque les prélèvements (c'est-à-dire la somme des prélèvements d'eaux souterraines et des prélèvements « non intentionnels » ou naturels) dépassent la recharge. Bien que la variabilité du climat et le changement climatique puissent exercer une certaine influence sur ce phénomène (en agissant sur la recharge des nappes et sur la demande en eau), l'épuisement des réserves d'eaux souterraines sur le long terme résulte le plus souvent d'une extraction intensive. Cet épuisement s'observe au niveau d'un grand nombre d'aquifères, situés en majorité dans les zones semi-arides et arides, où il constitue souvent une grave menace à l'utilisation durable des eaux souterraines à des fins d'irrigation. Au niveau mondial, le taux d'épuisement des réserves d'eaux souterraines est considérable : on estime qu'au début de ce siècle, il se situe entre 100 et 200 km³/an (Bierkens et Wada, 2019).

La baisse du niveau des nappes souterraines peut entraîner :

- L'augmentation des coûts, de la complexité technique et de la demande énergétique liés aux extractions d'eaux souterraines ;
- L'augmentation des pénuries d'eau causées par l'assèchement de puits, de zones aquifères ou d'aquifères entiers ;
- La dégradation des écosystèmes dépendant des eaux souterraines et des services fournis par les eaux souterraines autres que l'approvisionnement ;
- L'affaissement des sols dans les zones caractérisées par des sédiments hautement compressibles ou dans d'autres formations géologiques susceptibles de se déformer sous l'effet des variations de la pression hydraulique ;
- La concurrence entre secteurs d'utilisation des eaux souterraines ou entre utilisateurs de puits individuels ;
- Un accès de plus en plus inégal aux eaux souterraines (y compris la perte d'équité entre générations).

La pollution des eaux souterraines est un phénomène pratiquement irréversible : une fois pollués, les aquifères ont tendance à le rester

Plusieurs grands systèmes aquifères bien connus sont exposés à un épuisement significatif de leurs réserves à long terme, notamment ceux des plaines indo-gangétiques, de la grande plaine de Chine du Nord, de la Vallée Centrale de Californie, des Grandes Plaines des États-Unis et du système aquifère arabe. La plupart des eaux souterraines prélevées dans ces systèmes aquifères sont utilisées pour l'agriculture irriguée.

L'emploi des sols et les pratiques utilisées, le drainage artificiel ainsi que la gestion des eaux de surface comptent parmi les activités humaines qui influent sur le stockage d'eaux souterraines.

1.8.2 La pollution des eaux souterraines

La pollution des eaux souterraines rend celles-ci moins propres à la consommation ainsi qu'à d'autres emplois par les humains tout en affectant les écosystèmes qui en dépendent.

Il existe de nombreuses sources de pollution anthropique des nappes souterraines : la plupart d'entre elles sont situées en surface ou à proximité (l'agriculture, les établissements humains, les égouts, les décharges, les industries et autres productions urbaines, les réservoirs de stockage, les routes, les canaux, les canalisations, etc.), mais d'autres pollutions peuvent se produire sous la surface à de plus grandes profondeurs (à cause des puits, de l'exploitation pétrolière et gazière, de l'exploitation minière, du stockage souterrain des déchets et d'autres activités humaines souterraines). Largement répandue, la pollution d'origine agricole agit de façon diffuse (pollution non ponctuelle) et implique souvent de grandes quantités de nitrates, de pesticides et d'autres éléments agrochimiques. À l'inverse, la pollution d'origine industrielle et domestique est généralement ponctuelle. Les polluants d'origine industrielle sont nombreux (substances organiques et non organiques, micro-organismes, radionucléides) et varient en fonction des types de productions industrielles. Les polluants rejetés par les foyers et

retrouvés dans les eaux usées sont principalement des composés microbiologiques et des « micropolluants émergents » (tels les produits pharmaceutiques et de soins personnels ainsi que les perturbateurs endocriniens) (Lapworth et al., 2012).

Comme nous l'avons déjà mentionné dans le Prologue, on peut également trouver, outre les polluants anthropiques, des polluants géogéniques tels l'arsenic et le fluorure dans le sous-sol. Leur diffusion peut être favorisée par certaines activités humaines, comme le pompage des eaux souterraines, qui contribuent à leur libération de la matrice rocheuse et à leur circulation dans le sous-sol.

La pollution des eaux souterraines est un phénomène pratiquement irréversible : une fois pollués, les aquifères ont tendance à le rester. Comme la plupart des sources anthropiques de pollution se situent à la surface du sol ou à proximité, la pollution est le plus souvent observée dans les zones aquifères peu profondes, en particulier lorsqu'aucune couche de faible perméabilité ne les protège. Toutefois, en raison de l'augmentation constante des activités humaines dans les zones plus profondes du sous-sol (exploitation des hydrocarbures, fracturation, stockage souterrain, etc.), la pollution gagne également ces zones, bien que ce phénomène soit moins généralisé. La pollution des eaux souterraines constitue un problème majeur dans presque toutes les zones caractérisées par une forte densité de population et/ou une production agricole ou industrielle importante.

Il existe plusieurs raisons pour lesquelles l'eau douce souterraine peut devenir saumâtre ou saline

1.8.3 Salinisation des eaux souterraines

Il existe plusieurs raisons pour lesquelles l'eau douce souterraine peut devenir saumâtre ou saline.

L'une d'entre elles a trait aux inondations par eau de mer. En effet, lorsqu'elle inonde les terres côtières de faible altitude, l'eau de mer a tendance à s'infiltrer dans les aquifères sous-jacents, y remplaçant l'eau douce par de l'eau salée. Ce phénomène peut se produire de manière soudaine lors d'évènements exceptionnels (ondes de tempête, tsunamis), mais aussi de manière progressive, en conjonction avec la lente transgression marine causée par l'élévation du niveau de la mer. En termes de superficie, seul un très faible pourcentage des terres émergées de la planète est exposé au risque d'inondation marine, mais ces zones sont souvent densément peuplées. De plus, au vu des prévisions concernant l'élévation du niveau de la mer, ce phénomène menace de priver les îles de faible altitude et à la topographie extrêmement plate (comme les atolls de l'océan Pacifique) de ressources en eau douce suffisantes pour assurer la pérennité de l'habitat humain.

L'extraction des eaux souterraines constitue aussi un facteur de salinisation. En effet, elle peut non seulement provoquer l'intrusion d'eau de mer dans les zones côtières mais aussi entraîner le déplacement vertical ou horizontal d'eaux souterraines saumâtres ou salines relativement stagnantes vers la zone d'eau douce souterraine exploitée. Ces deux phénomènes constituent de graves menaces sur les ressources en eau douce souterraine, en particulier en zones côtières.

L'un des autres facteurs de salinisation des eaux souterraines est l'irrigation. Après arrosage, l'eau est temporairement stockée dans la couche supérieure du sol où les cultures la puisent. Cette eau est absorbée par les cultures de façon sélective, c'est dire qu'une partie des solides qui y sont dissous demeure dans le sol. Par la suite, ces sels passent dans les couches plus profondes du sol, soit sous l'effet des précipitations pendant les périodes les plus humides de l'année, soit à cause d'un surplus d'eau d'irrigation répandue par l'agriculteur pour éviter la salinisation du sol. Par conséquent, la teneur en solides dissous des aquifères libres peu profonds, situés à proximité des zones irriguées, a tendance à augmenter progressivement si aucun système de drainage ne détourne les eaux minéralisées vers les eaux de surface. Ce mécanisme de salinisation est encore renforcé par l'augmentation des solides dissous dans les eaux souterraines en raison des produits agrochimiques qui s'infiltrent dans le sol.

1.8.4 Priorités, répartition et accès

Sans aucune forme de contrôle de la part de la communauté ou du gouvernement, il est peu probable qu'une combinaison optimale des services fournis par les eaux souterraines soit instaurée au sein d'une zone donnée et que tous les habitants bénéficient équitablement de cette ressource. Ceci s'explique notamment par l'incompatibilité des services fournis par les eaux souterraines, par la concurrence entre utilisateurs potentiels, par l'accès entièrement libre à la ressource et son caractère de bien commun ainsi que par l'absence de conditions équitables.

Dans de nombreuses régions, on observe que les écosystèmes dépendant des eaux souterraines se dégradent en raison de l'extraction intensive et non contrôlée de ces eaux par des particuliers ou des entreprises en quête de profits économiques à court terme. La plupart des eaux souterraines sont prélevées par la part la plus riche de la population alors que les personnes relativement pauvres et qui ne sont pas propriétaires (notamment les réfugiés et autres groupes de migrants) n'ont souvent aucun accès, ou un accès très limité, à cette ressource. L'exploitation des eaux souterraines à des fins de distribution publique à usage domestique n'est souvent pas considérée comme prioritaire et reste donc insuffisante. Ceux qui tirent profit de l'extraction des eaux souterraines ignorent souvent les effets négatifs qui lui sont associés, au détriment de la durabilité des ressources et des générations futures. Il est urgent de traiter de tels problèmes, surtout dans les zones pauvres en eau, et pour ce faire, établir des politiques qui puissent y remédier.

1.9 Les possibilités d'accroître les bénéfices fournis par les eaux souterraines

Les immenses volumes d'eaux souterraines extraits et utilisés, ainsi que les nombreux services qu'offre cette ressource au niveau local, démontrent son importance capitale pour l'humanité et pour les écosystèmes qui en dépendent. Même si les taux d'extraction dans plusieurs régions ne sont pas viables et devront donc, tôt ou tard, diminuer, il existe diverses possibilités d'accroître les bénéfices apportés par les eaux souterraines. On trouvera ci-après une description de ces opportunités, qui contribueront à la réalisation des objectifs définis aux niveaux local, national ou supranational (voir la Directive de l'Union européenne sur les eaux souterraines ou les objectifs de développement durable de l'ONU). La plupart d'entre elles visent à mettre davantage d'eau souterraine à la disposition des humains afin de répondre à une demande en eau en constante augmentation, en raison de la croissance démographique et du changement climatique.

1.9.1 Tirer parti du potentiel inexploité des eaux souterraines

Dans plusieurs régions du monde, il existe des aquifères qui, à la différence de ceux exploités de façon intensive, demeurent sous-exploités à des taux bien inférieurs aux taux viables maximaux. Ces aquifères abritent des *ressources en eaux souterraines dont le potentiel reste inexploité* alors qu'elles pourraient être extraites et utilisées. Bien que l'on ne dispose pas encore d'un inventaire mondial de ces aquifères, les informations disponibles suggèrent que beaucoup d'entre eux se situent dans des régions faiblement peuplées d'Afrique subsaharienne (MacDonald et al., 2012 ; Cobbing et Hiller, 2019), dans la moitié nord de l'Amérique du Sud, au sein de la Fédération de Russie et au Canada entre autres (Margat et Van der Gun, 2013). Dans certaines parties de ces régions, les prélèvements sont davantage freinés par le manque de moyens financiers nécessaires à la mise en place d'infrastructures techniques appropriées que par une faible demande en eau ou une faible disponibilité des eaux souterraines.

Dans plusieurs régions du monde, il existe des aquifères qui, à la différence de ceux exploités de façon intensive, demeurent sous-exploités, à des taux bien inférieurs aux taux viables maximaux

1.9.2 Mettre à profit les ressources en eaux souterraines non conventionnelles

Dans un contexte marqué par une pénurie croissante d'eau, il est possible d'envisager le développement de ressources en eaux souterraines non conventionnelles. Si celles-ci peuvent permettre de pallier le manque de sources d'eau douce, leur exploitation est généralement moins intéressante que celle des eaux souterraines conventionnelles, en raison de contraintes techniques, environnementales ou financières.

Parmi ces ressources non conventionnelles figurent les *eaux souterraines saumâtres*, souvent présentes à des profondeurs relativement faibles. Les eaux souterraines saumâtres peuvent être utilisées directement, sans aucun traitement, pour les usages de l'aquaculture saumâtre, les systèmes de refroidissement, les opérations dans l'industrie pétrolière et gazière, et — si la teneur en minéraux n'est pas trop élevée — l'irrigation de cultures halophytes. Pour les usages

qui nécessitent une eau moins minéralisée telle la consommation d'eau potable, les eaux souterraines saumâtres peuvent être mélangées à de l'eau douce ou être dessalées. La mise à profit des eaux souterraines saumâtres suscite un grand intérêt, en particulier dans la région arabe et dans les régions plus sèches des États-Unis (Stanton et Dennehy, 2017 ; Dawoud, 2019).

Les *eaux douces profondes* (définies ici comme les eaux souterraines contenues dans les aquifères dont la surface de saturation se trouve à plus de 500 m de profondeur) ne sont que rarement exploitées à des fins d'approvisionnement en eau et peuvent donc être classées comme ressource non conventionnelle. Elles constituent une option intéressante, à condition que l'aquifère profond qui les contient bénéficie d'une recharge significative. Cependant, la plupart des aquifères profonds ne contiennent vraisemblablement que des ressources non renouvelables, ce qui exclut leur exploitation durable. En revanche, il serait possible d'exploiter temporairement ces ressources en cas de pénurie pendant les périodes exceptionnellement sèches, lorsque les autres sources d'eau deviennent insuffisantes (Van der Gun et al., 2012).

Le nombre exceptionnel de nappes d'eaux souterraines volumineuses, ainsi que la capacité tampon unique de cette ressource, peuvent potentiellement assurer la sécurité de l'approvisionnement en eau dans le contexte de l'adaptation au changement climatique

Déjà dans l'Antiquité, la présence d'*eau douce souterraine en mer* était connue et les sources d'eau douce sous-marines étaient utilisées comme eau de boisson dans certains endroits (Taniguchi et al., 2002). Des inventaires récents ont permis de montrer la présence d'eaux douces ou saumâtres souterraines offshore dans de nombreuses régions du monde, soit sous la forme de zones d'écoulement de systèmes aquifères dont la recharge a lieu sur les terres adjacentes (Taniguchi et al., 2002 ; Zhou et al., 2019), soit sous la forme de masses d'eaux souterraines non renouvelables apparues lors de périodes géologiques antérieures (Post et al., 2013 ; voir également la figure 7 du Prologue). Selon les références précitées, la totalité des taux d'écoulement et des volumes stockés est considérable au niveau mondial. Exploiter ces ressources en eaux souterraines non conventionnelles n'est toutefois pas facile et risque de coûter cher.

1.9.3 Développer l'énergie géothermique

Comme nous le verrons au chapitre 7, les eaux souterraines offrent diverses opportunités de développer la production d'énergie géothermique. Malgré les progrès réalisés ces dernières années, cette branche du secteur de l'énergie n'en est encore qu'à ses débuts. Il reste, en effet, beaucoup à faire pour accroître l'exploitation de l'énergie géothermique à l'échelle mondiale, non seulement afin d'augmenter les bénéfices globaux tirés des eaux souterraines mais aussi afin de contribuer, de façon significative, à la transition vers des énergies propres et la neutralité carbone.

La gestion de la recharge des aquifères (MAR) est une intervention technique efficace qui permet d'exploiter la capacité de stockage naturelle du sous-sol (voir encadré 7.1 et section 11.5). Grâce à cette intervention, l'excédent d'eau qui serait autrement perdu est temporairement stocké et rendu disponible pour une utilisation ultérieure appropriée. Au cours des soixante dernières années, MAR a vu son application multipliée par dix ; toutefois, le potentiel d'expansion demeure considérable et pourrait passer des 10 km³/an actuels à environ 100 km³/an (Dillon et al., 2019). MAR figure parmi les interventions les plus efficaces en matière de gestion des eaux souterraines.

1.9.5 S'adapter au changement climatique et atténuer les catastrophes

Le nombre exceptionnel de nappes d'eaux souterraines volumineuses, ainsi que la capacité tampon unique de cette ressource, peuvent potentiellement assurer la sécurité de l'approvisionnement en eau dans le contexte de l'adaptation au changement climatique (voir chapitre 7). Elles procurent notamment un accès facile et universel à l'eau, donnant la possibilité de disposer d'un approvisionnement fiable en cas de pénurie des sources d'eau de surface (pendant les périodes de sécheresse prolongées par exemple).

Lors de bouleversements et de chocs ponctuels, la capacité tampon des nappes souterraines peut également contribuer à atténuer les impacts des catastrophes et des situations d'urgence d'origine humaines ou naturelles — tels les accidents industriels, les sécheresses, les inondations, les tremblements de terre et les glissements de terrain — et ce lorsque les systèmes d'approvisionnement en eaux de surface sont directement touchés (Vrba et Verhagen, 2011).

Chapitre 2

Aspects juridiques et institutionnels de la gouvernance des eaux souterraines

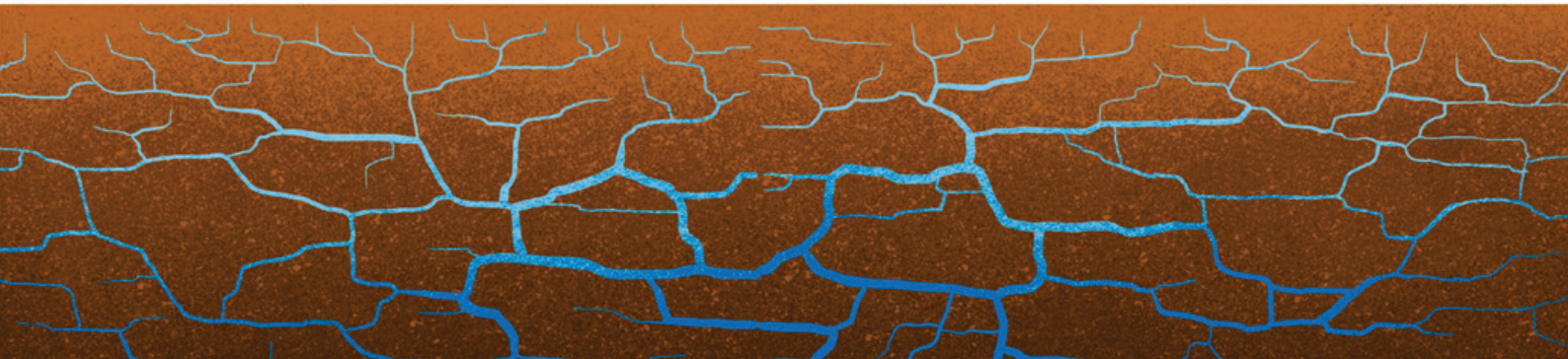
PNUD
Jenny Grönwall* et Marianne Kjellén

UNESCO-PHI
Alice Aureli, Stefano Burchi, Mohamed Bazza** et Raya Marina Stephan**

Avec les contributions de Gabriel Eckstein (École de droit de l'Université A&M du Texas), Lesha Witmer (WfWP), Margreet Zwarteveen (IHE Delft), Aurélien Dumont (UNESCO-PHI), Danielle Gaillard-Picher (GWP), Rio Hada (HCDH), Rebecca Welling (UICN) et Maki Tsujimura (Université de Tsukuba).

* À la demande de la Facilité pour la gouvernance de l'eau au sein du SIWI

** Affilié à l'AIDA pour le compte de l'UNESCO



Le présent chapitre définit les concepts connexes de gouvernance et de gestion des eaux souterraines, en expliquant ce qui les différencie. Il décrit ensuite les instruments juridiques qui régissent cette gestion et cette gouvernance ainsi que les aspects institutionnels qui s'y rapportent.

2.1 Gouvernance et gestion des eaux souterraines

La gouvernance et la gestion des eaux souterraines concernent toutes deux l'extraction et la distribution, l'efficacité d'emploi et la protection de la qualité de ces eaux. Ce rapport établit une distinction entre les deux concepts (voir encadrés 2.1 et 2.2) quoiqu'ils soient souvent employés de façon interchangeable. Les procédés de *gouvernance* des eaux souterraines établissent les conditions de gestion, de planification et de mise en œuvre des politiques en matière d'eaux souterraines et s'en font les vecteurs ; Au rang des principes d'une « bonne » gouvernance de l'eau figurent l'accès équitable, la responsabilité, la transparence, la participation des parties prenantes, l'inclusion, etc. La *gestion* des eaux souterraines est orientée vers l'action : en se concentrant sur les activités de mise en œuvre pratique et sur les détails des opérations quotidiennes, elle met l'accent sur les résultats des décisions (Linton et Brooks, 2011).

La gouvernance et la gestion des eaux souterraines peuvent s'avérer difficiles en raison de la nature commune de la plupart des ressources souterraines comme du manque d'informations et de la diversité des parties prenantes comme de leurs intérêts (Ross, 2016). Les systèmes aquifères (le milieu rocheux ou sédimentaire saturé et l'eau contenue dans la zone saturée de la formation) servent d'« hôtes » de la ressource, fournissant des services écosystémiques tel le stockage naturel (infrastructure verte) (ONU, 2021 ; Puri et Villholth, 2018 ; Assemblée générale des Nations Unies, 2009). Les réalités hydrogéologiques, socio-économiques et politico-institutionnelles des systèmes aquifères doivent être prises en considération en parallèle de la manière dont ils

Encadré 2.1 Définir la gouvernance des eaux souterraines

Beaucoup d'efforts ont été déployés pour identifier les aspects essentiels de la gouvernance des eaux souterraines. Le projet « *Gouvernance des eaux souterraines : un cadre d'action global* » (Projet Gouvernance des ressources en eaux souterraines, 2016a, 2016b, 2016c) en est l'illustration la plus complète. Il définit la gouvernance des eaux souterraines ainsi :

« *La gouvernance des eaux souterraines comprend la promotion d'une action collective responsable visant à assurer le contrôle, la protection et l'utilisation socialement responsable des ressources en eaux souterraines et des systèmes aquifères pour le bien de l'humanité et des écosystèmes dépendant. Cette action est facilitée par un cadre et des principes directeurs* » (Projet Gouvernance des ressource en eaux souterraines, 2016c, p.17).

À partir de cette définition, on peut attribuer à la gouvernance quatre *composantes* ou dispositions principales :

1) Un **cadre institutionnel** caractérisé par la représentation et le leadership, les organisations et les capacités ainsi que l'engagement et la participation des parties prenantes ;
2) Un **cadre juridique** complet ;
3) Des systèmes de **connaissances** et une **sensibilisation** plus généralisée aux problèmes ;
4) **Des politiques, des structures d'incitation et des plans** alignés sur une gouvernance efficace.

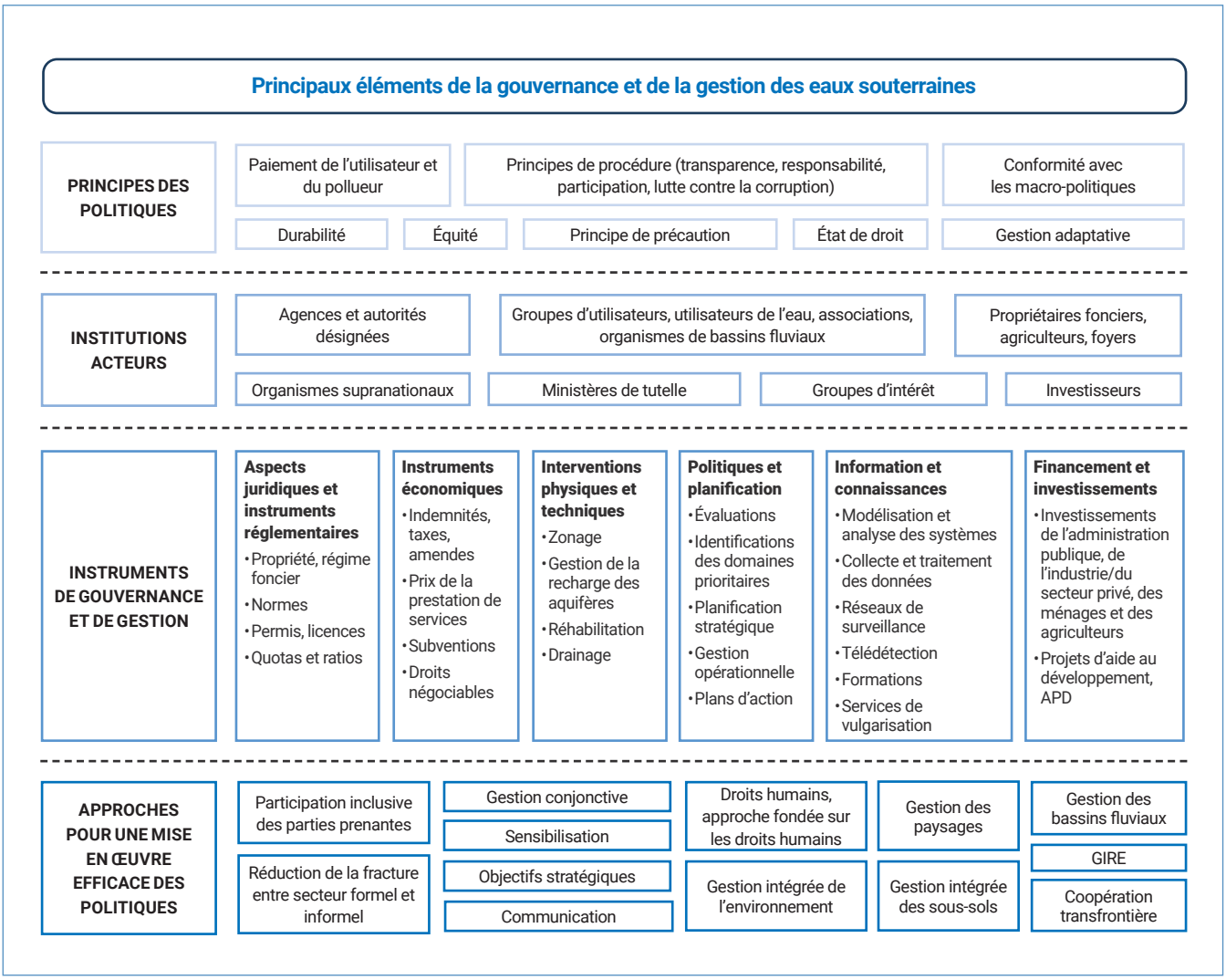
Les *principes directeurs* de la gouvernance des eaux souterraines sont les suivants :

- la gestion combinée des eaux de surface et des eaux souterraines ;
- la gestion conjointe de la quantité et de la qualité des eaux souterraines ;
- la gouvernance conjointe de l'espace et des ressources souterraines, qui comprend la régulation de toutes les activités et fonctions situées dans l'espace souterrain afin d'en assurer une utilisation harmonieuse et d'éviter les dommages indésirables et irréversibles ;
- l'intégration « verticale » des autorités locales, des autorités de district/provinciales et des autorités fédérales, ainsi que les structures internationales le cas échéant, dans la planification et la gestion ;
- la coordination (horizontale) des politiques des autres secteurs qui affectent les eaux souterraines ou sont affectés par celles-ci.

sont utilisés et gérés. À cette complexité, il faut ajouter l'invisibilité des ressources en eaux souterraines et le décalage temporel de leur variation : ainsi, les impacts négatifs sur celles-ci peuvent rester invisibles pendant des années. De même, les limites physiques de l'aquifère sont imperceptibles tant pour les utilisateurs que pour les décideurs. En conséquence de quoi, les risques et les problèmes associés aux nappes souterraines et aux aquifères ne sont souvent pas traités de façon proactive.

La gouvernance et la gestion des eaux souterraines s'inscrivent dans le cadre politique plus large d'un pays ou d'un bassin, et ont trait aux principes politiques et à la planification, aux aspects juridiques ainsi qu'à la mise en œuvre. La figure 2.1 suggère la manière dont les idées et principes politiques majeurs sont traduits, en partie grâce aux lois et règlements, en instruments de gestion. Reste que les méthodologies et les approches de mise en œuvre constituent une étape ou un véhicule critiques dans l'obtention de résultats donnant suite aux intentions politiques.

Figure 2.1 Principaux éléments de gouvernance et de gestion des eaux souterraines : des principes politiques aux méthodes de mise en œuvre



Source : auteurs du chapitre.

Les eaux souterraines étant souvent considérées comme une ressource privée (c'est dire une ressource étroitement liée à la propriété foncière et qui, dans certaines juridictions, est traitée comme une propriété privée), il est difficile de légiférer à leur égard comme de mettre en place une gouvernance et une gestion descendantes. Dans la pratique, les décisions relatives aux puits individuels sont prises principalement par les propriétaires (fonciers) et il est souvent difficile, pour les gouvernements, de quantifier, de distribuer et de réguler les

prélèvements et les utilisations des eaux souterraines, notamment lorsque leurs budgets sont limités. Le corolaire en est que presque partout, la gouvernance et la gestion des eaux souterraines doit tenir compte des acteurs publics comme privés ainsi que des communautés locales. De même, au vu du rôle des eaux souterraines en tant que bien commun et public, les gouvernements doivent assumer pleinement la responsabilité qui leur incombe en tant que gardiens de cette ressource. Une plus grande intégrité et des politiques qui améliorent l'accès des petits exploitants et des femmes ont plus de chances de contribuer au bien commun et d'assurer un développement durable.

2.2 Instruments juridiques

La législation relative aux ressources en eau souterraine définit des droits contraignants et exécutoires, et identifie les droits et obligations qui sont ensuite mis en œuvre au travers des décisions de gestion, y compris la surveillance et l'application. Par exemple, la directive-cadre de l'Union européenne sur l'eau (Parlement européen/Conseil européen, 2000) et sa Directive sur la protection des eaux souterraines (Parlement européen/Conseil Européen, 2006) ont déclenché un grand nombre d'activités de gestion.

Les lois et les règlements qui intègrent des objectifs sociétaux et politiques (voir chapitre 10), et qui définissent un cadre facilitateur et réglementaire pour la réalisation de ces objectifs, sont des éléments fondamentaux de la gouvernance des eaux souterraines. Ils sont également instrumentaux dans leur gestion. Des cadres juridiques stables permettent également aux gouvernements et aux utilisateurs d'eaux souterraines de planifier la gestion des ressources (voir chapitre 10) sur le long terme et de concilier des intérêts concurrents, notamment ceux de l'environnement et des générations futures (Smith et al., 2016).

Les lois et les réglementations nationales permettent de fixer les conditions d'accès aux eaux souterraines et d'encadrer les activités humaines qui ont un impact sur la qualité de celles-ci

Les cadres juridiques doivent inclure la protection des zones de déversement et de recharge ainsi que celle des zones à proximité des puits d'approvisionnement en eau. Ils doivent aussi établir des normes de rendement durable et des contrôles sur les extractions ainsi que des réglementations sur les usages combinés. Ces cadres nécessiteraient le partage de données afin de faciliter des processus importants dont l'équilibre des intérêts concurrents ou conflictuels entre les parties prenantes, la réduction/l'élimination des inégalités au niveau de l'accès à la ressource et de son utilisation ainsi que la coordination avec les utilisations urbaines et rurales des terres afin de permettre une gestion d'ensemble de l'espace souterrain (projet Gouvernance des ressources en eaux souterraines, 2016c).

Les lois et les réglementations nationales permettent de fixer les conditions d'accès aux eaux souterraines et d'encadrer les activités humaines qui ont un impact sur la qualité de celles-ci (voir section 2.2.2). Au rang des autres instruments juridiques pertinents figurent ceux qui :

a) Assurent un accès à l'eau pour répondre aux besoins essentiels puisqu'il s'agit d'un droit humain. Les droits humains à l'eau et à l'assainissement comme le droit à un environnement sûr, propre, sain et viable, sont différents des droits sur l'eau en ce qu'ils ne sont ni temporaires ni soumis à l'approbation d'un État, et ne peuvent être retirés. L'Assemblée générale des Nations Unies et le Conseil des droits de l'homme ont reconnu l'accès équitable à l'eau potable et à l'assainissement comme deux droits humains fondamentaux (Assemblée générale des Nations Unies, 2010 ; CDH, 2010). À ce titre, les ressources en eaux souterraines doivent être protégées aux fins du respect du droit humain à un environnement sain, propre, salubre et viable, récemment reconnu par le Conseil des droits de l'homme (CDH, 2021). Dans les endroits où les services de distribution d'eau sont inexistants ou inadéquats, la dépendance des foyers et des communautés à l'égard des eaux souterraines est bien supérieure, ce qui a des conséquences sur ce que l'État se doit de faire pour respecter, protéger et garantir le droit à l'eau potable dans le cadre de la protection des ressources. Le rôle de l'État va du conseil aux utilisateurs finaux, afin de les inciter à protéger « leurs » ressources en eaux souterraines, à l'aide aux foyers dont les puits se sont asséchés en raison de sècheresses récurrentes (Grönwall et Danert, 2020).

Dans la majorité des juridictions aujourd'hui, la propriété publique ou gouvernementale des eaux souterraines est la norme

b) Garantissent l'accès aux eaux souterraines comme moyen de subsistance et de production à petite échelle des communautés traditionnelles, conformément au droit coutumier. Les règlements formels, cependant, peuvent ignorer le droit coutumier avec pour résultat que les utilisateurs se retrouvent sans protection légale face aux détenteurs formels de droits sur l'eau (Hodgson, 2016). Les règles coutumières continuent de jouer un rôle important : par exemple, les ressources en eaux souterraines sont considérées comme appartenant à la communauté tandis que le concept de droits individuels est refusé. Dans une grande partie de l'Afrique et de l'Asie, les droits coutumiers sur l'eau sont intrinsèquement liés à la terre et intégrés aux systèmes fonciers (Mechlem, 2016 ; Meinzen-Dick et Nkonya, 2007). Toutefois, les règles coutumières relatives aux ressources en eau peuvent être injustes, voire discriminatoires, et contraires aux intérêts des femmes, des enfants et des minorités (Hodgson, 2016) ; lorsque les femmes et les groupes minoritaires se voient refuser la propriété foncière formelle, ils peuvent également être privés de droits sur les eaux souterraines. Une gouvernance responsable des régimes fonciers, des lieux de pêche et des forêts est inextricablement liée à l'accès à d'autres ressources naturelles, dont les eaux souterraines, ainsi qu'à leur gestion (FAO, 2012).

c) Réglementent les emplois des sols qui nuisent aux processus naturels de recharge et de déversement des nappes souterraines et à la fonction de soutien des nappes souterraines à l'environnement, en particulier en ce qui concerne les zones humides et les oasis.

d) Réglementent la formation et le fonctionnement des associations d'utilisateurs d'eaux souterraines en matière d'attribution, de contrôle et de responsabilités politiques au niveau des eaux souterraines communes.

Encadré 2.2 Définir la gestion des eaux souterraines

Le Projet Gestion des ressources en eaux souterraines (2016c, p.17) définit la gestion des eaux souterraines comme « … *les activités entreprises par des acteurs mandatés pour mettre à profit, utiliser et protéger durablement les ressources en eaux souterraines* ».

La gestion comprend les mesures, les interventions, les actions et les activités pouvant être pratiques, techniques et matérielles à différents niveaux, et qui visent à « *contrôler l'extraction des eaux souterraines et à prévenir la dégradation de leur qualité, avec pour objectif en général d'assurer la fourniture viable d'eau douce et de préserver, pour l'environnement et les écosystèmes, les conditions idéales qui dépendent des eaux souterraines* ». Les activités de gestion technique comprennent le forage et l'entretien des puits, l'installation de technologies permettant d'économiser de l'eau, etc. (voir chapitre 11).

Le droit international de l'eau définit les droits et les obligations des États souverains en ce qui concerne les rivières, les lacs, les bassins et les aquifères qui sont traversés par une frontière internationale, forment ou sous-tendent celle-ci (dans le cas des eaux souterraines). Il a récemment commencé à s'intéresser spécifiquement aux aquifères et aux eaux souterraines ; une poignée de traités et d'accords internationaux concernant spécifiquement les aquifères et les eaux souterraines transfrontaliers ont été conclus (voir chapitre 12).

2.2.1 Droits sur l'eau : des droits de propriété privée aux droits administratifs

Dans la majorité des juridictions aujourd'hui, la propriété publique ou gouvernementale des eaux souterraines est la norme. L'extraction et l'utilisation des eaux souterraines s'effectuent sur la base des droits administratifs tels que des permis individuels, des licences ou des concessions qui, dans de nombreuses juridictions, sont limités dans le temps et qualifiés quant aux volumes et taux d'extraction (Salman et Bradlow, 2006 ; Nelson et Quevauviller, 2016 ; Projet Gouvernance des ressources en eaux souterraines, 2016c ; Burchi, 2018a). Cependant, dans certaines juridictions aux populations importantes comme l'Inde, le Pakistan, les Philippines et plus de la moitié des États qui constituent les États-Unis, les droits sur les eaux souterraines sont liés à la propriété foncière et les eaux souterraines sont considérées comme une propriété privée (Closas et Molle, 2016 ; Tarlock et Robinson, 2019).

Le Projet Gouvernance des ressources en eaux souterraines a souligné l'importance de faire entrer cette ressource dans le domaine public en dépit des difficultés que cela peut impliquer sur le plan juridique et pratique, et ce afin de permettre à l'État d'attribuer des droits d'utilisation et de réglementer les extractions conformément aux objectifs sociétaux de durabilité, d'équité et d'efficacité (Projet Gouvernance des ressources en eaux souterraines, 2016c). Le passage des eaux souterraines du domaine privé au domaine public, bien que difficile compte tenu des connotations politiques, peut être accompli avec succès (comme cela a été le cas dans des juridictions telles que l'Argentine, les États australiens de Nouvelle-Galles du Sud et de Victoria, l'Allemagne, l'Italie, le Maroc, l'Afrique du Sud, la Tanzanie, l'Ouganda et le Zimbabwe) par le biais de la législation ou des décisions rendues par les plus hautes juridictions (Burchi, 1999, 2012, 2018a ; Burchi et Nanni, 2003 ; Salman et Bradlow, 2006). En Espagne, en revanche, la tentative de faire passer la propriété des eaux souterraines du privé au public, sous l'égide de la loi sur l'eau de 1985, s'est finalement soldée par un échec malgré une décision favorable de la Cour suprême et les propriétaires privés d'avant 1985 peuvent donc continuer à jouir de droits d'usufruit. Les nouveaux droits sont toutefois attribués dans le cadre de la propriété publique. Cette situation illustre les réticences occasionnées par ces changements de propriété (Closas et Molle, 2016).

Dans certaines juridictions, les eaux souterraines sont réglementées en conjonction avec les eaux de surface, dont font partie les fleuves. Dans d'autres, elles sont soumises à des lois-cadres. De plus en plus de pays renforcent leurs cadres légaux relatifs aux eaux souterraines, en les classant au même rang que les régimes des eaux de surface, en protégeant la quantité ainsi que la qualité, et en impliquant les parties prenantes pour concilier les intérêts privés et publics (Mechlem, 2016). L'encadré 2.3 présente un exemple australien, où des allocations et des droits d'extraction par attribution de parts ont été mis en place afin de gérer les extractions d'eaux souterraines. Le recours à une telle réglementation sur l'extraction des ressources peut permettre de mieux équilibrer la fonction de soutien à l'habitat et à l'environnement des nappes souterraines et des aquifères avec les utilisations productives et les autres demandes (Burchi, 2018a ; Smith et al., 2016).

Encadré 2.3 Passer de droits d'extraction de l'eau « basés sur le volume » à des droits d'extraction « par attribution de parts » en Nouvelle-Galles du Sud (Australie)

L'État australien de Nouvelle-Galles du Sud a introduit un régime d'accès groupé en vertu de la loi sur la gestion de l'eau (2000). Le quantum des eaux souterraines tirées des aquifères est passé d'une allocation volumétrique à une part variable des eaux souterraines disponibles dans un aquifère donné. Les licences d'extraction sont composées de deux parties : une « composante par part », qui donne droit au titulaire de la licence à un volume d'eau souterraine disponible dans l'aquifère et une « composante extraction », qui donne au titulaire de la licence le droit de prélever de l'eau dans un aquifère donné à des moments, des taux et des endroits spécifiques. La première est le pivot de ce régime de gestion et de gouvernance sophistiqué, et est déterminée sur la base de règles de partage de l'eau (y compris des eaux de surface) et de plans de partage de l'eau négociés de manière participative dans le cadre de plans décennaux cycliques de gestion des aquifères (voir chapitre 10) (Burchi, 2018a).

Il convient de noter que dans certains cas, les droits relatifs aux eaux souterraines et ceux relatifs aux eaux de surface entrent en conflit, comme dans le cas de l'assèchement d'un cours d'eau causé par le pompage intensif des eaux souterraines à proximité et vice versa. Une gestion conjointe revêt la possibilité de traiter ensemble les droits sur les eaux souterraines et les droits sur les eaux de surface comme cela a été fait en Nouvelle-Galles du Sud, en Australie (encadré 2.3).

L'émission et le rejet illégaux de substances dans les nappes ou dans le sol, de même que le traitement illégal des eaux usées d'une manière qui soit nuisible et risquée pour les systèmes d'eaux souterraines et/ou la santé humaine, peuvent être considérés comme un délit ou un crime

2.2.2 La réglementation de la pollution

Les sources ponctuelles de pollution, notamment le rejet industriel d'eaux usées (incluant notamment les puits d'injection), la manipulation de déchets solides pouvant affecter les ressources en eau souterraine et les égouts municipaux, peuvent être réglementées par l'intermédiaire de permis ainsi que par des normes de qualité sur les effluents et/ou sur l'eau ambiante. Le rejet direct de déchets dangereux ou toxiques dans les nappes souterraines a été interdit dans certaines juridictions (Burchi, 2018a). En revanche, la pollution non ponctuelle provenant de sources diffuses ou indistinctes nécessite des mesures de prévention telles que la mise en place d'une réglementation de l'emploi des terres et/ou l'imposition des meilleures pratiques agricoles et environnementales. Tout comme pour la pollution ponctuelle, ces mesures comprennent l'interdiction ou la limitation de certaines activités polluantes et consommatrices d'eau, la limitation de l'utilisation de pesticides, d'herbicides et d'engrais (notamment pour réduire l'accumulation d'azote et de phosphore), la restriction de certains modes de culture, la réduction de l'intensité du pâturage animal, la remise en état des terres et la gestion du drainage (Mechlem, 2016).

L'émission et le rejet illégaux de substances dans les nappes ou dans le sol, de même que le traitement illégal des eaux usées d'une manière qui soit nuisible et risquée pour les systèmes d'eaux souterraines et/ou la santé humaine, peuvent être considérés comme un délit ou un crime. Des sanctions et des peines peuvent être prévues dans les cas de rejets sans permis ou en violation d'un permis, en vertu du droit pénal, civil ou administratif. Les efforts d'application des mesures et la poursuite en justice des pollueurs sont souvent toutefois difficiles en raison de la nature invisible des eaux souterraines.

2.3 Aspects institutionnels

La *gouvernance* des eaux souterraines s'applique à de multiples échelles et niveaux géographiques, y compris aux niveaux régional (comme dans l'Union européenne) et transfrontalier. En revanche, la *gestion* des eaux souterraines se fait plus souvent aux niveaux micro et méso. Différentes dispositions sociales/institutionnelles, organisationnelles, financières et techniques, ainsi que des règles, pratiques et normes communément acceptées, façonnent l'accès aux eaux souterraines. C'est aux niveaux micro et méso qu'il faut consacrer plus d'attention pour répondre aux besoins des personnes les plus pauvres (Cleaver et al., 2005).

Il existe une diversité de parties prenantes et d'acteurs au sein des institutions ayant un rapport avec les eaux souterraines. Il s'agit de représentants des secteurs public et privé, des autorités ou comités (régionaux) de l'eau, des services publics, des organismes de bassins fluviaux, des communautés, des groupes informels et de la société dans son ensemble. Une partie de la mission de ces institutions est de mettre en œuvre les politiques, de faire appliquer les lois, de traduire les décisions en actions et de garantir l'effectivité des réglementations, des procédures de gouvernance et d'application mandatée (Smith et al., 2016) sur la base des informations et des connaissances sur les systèmes d'eaux souterraines. Les agences gouvernementales sont mandatées pour les activités de gouvernance et de gestion des eaux souterraines à plusieurs niveaux mais dans la pratique, leur rôle peut varier considérablement, allant d'une approche réglementaire directive à un positionnement plus permissif de « laissez-faire » (Kemper, 2007). Les rôles (ou les buts) assignés ou autorisés peuvent également être très différents chez les parties prenantes. Par exemple, les normes et les institutions locales peuvent influer sur la division du travail et des fonctions qui, en retour, déterminent l'approvisionnement en eau et sa répartition. De plus, les organisations communautaires peuvent être divisées en factions, divisées entre genres et sectaires (Cleaver et al., 2005). Lorsque les utilisateurs d'eaux souterraines opèrent en tant qu'individus ou communautés (y compris par l'approvisionnement autonome en zones urbaines et par les systèmes d'irrigation des agriculteurs), il se peut qu'il n'y ait peu, voire aucune, institution formelle grâce à laquelle la gouvernance peut s'opérer à grande échelle.

En pratique, la performance des organismes publics peut être très réduite ou proactive et efficace selon ce que permettent les cadres (y compris les réglementations), selon le niveau de sensibilisation à l'importance des eaux souterraines et le niveau d'engagement politique, selon les budgets et, par conséquent, la capacité de gestion, selon le leadership et/ou les mandats octroyés. Les pressions commerciales et politiques en faveur de la surexploitation des eaux souterraines constituent un facteur supplémentaire, de même que la situation politique générale et la position du gouvernement aux yeux de la population locale (y compris la confiance mutuelle ou son absence).

Une unité gouvernementale nationale peut assurer à la fois une intégration verticale entre niveaux national et local, et une coopération horizontale entre différents niveaux et à l'interface avec les autres secteurs. Au niveau du bassin fluvial ou du système aquifère, les organisations de parties prenantes peuvent jouer un rôle important dans la coordination de la planification et de la gestion des eaux souterraines. Parce que les eaux souterraines sont considérées (souvent à tort) comme une ressource locale, les organisations décentralisées (y compris les municipalités) ont un rôle essentiel à jouer. Cependant, un aquifère peut s'étendre sous plus d'un bassin fluvial, ce qui complique la gouvernance des bassins fluviaux et des aquifères ainsi que la gestion intégrée des ressources en eau. Les gouvernements doivent s'efforcer de rechercher l'engagement systématique des parties prenantes, l'objectif étant de créer des mécanismes permanents de participation de celles-ci. Une telle démarche peut prendre la forme d'associations d'utilisateurs ou d'autres fora (projet Gouvernance des ressources en eaux souterraines, 2016c).

Selon le projet Gouvernance des ressources en eaux souterraines (2016c), envisager un « cadre d'action global » implique de disposer d'institutions efficaces ayant la capacité d'anticiper et de planifier, d'être inclusives et légitimes aux yeux des parties prenantes, et de parvenir à des engagements crédibles et vérifiables ayant recours aux éléments suivants :

- Une structuration organisationnelle solide, dont une capacité adéquate pour l'élaboration de politiques, et l'administration publique de l'utilisation des ressources et de la protection contre la pollution ;
- Des mécanismes d'engagement et de participation permanents des parties prenantes afin de favoriser des attitudes et des actions socialement responsables relativement aux eaux souterraines considérées comme ressource commune ;
- Des procédures de coordination intersectorielle et de cogestion afin de permettre aux problèmes relatifs aux eaux souterraines d'être pris en compte de manière adéquate dans les politiques et les pratiques des secteurs afférents ;
- Des institutions pour la gestion des ressources en eaux souterraines allant au-delà des frontières intranationales et internationales (le cas échéant).

Les institutions ne sont pas suffisantes en elles-mêmes pour assurer une gouvernance appropriée des eaux souterraines et des aquifères intranationaux et internationaux. Elles doivent être accompagnées par des politiques nationales (et parfois infranationales) et par des lois qui guident ces institutions dans leur travail (voir chapitre 10).

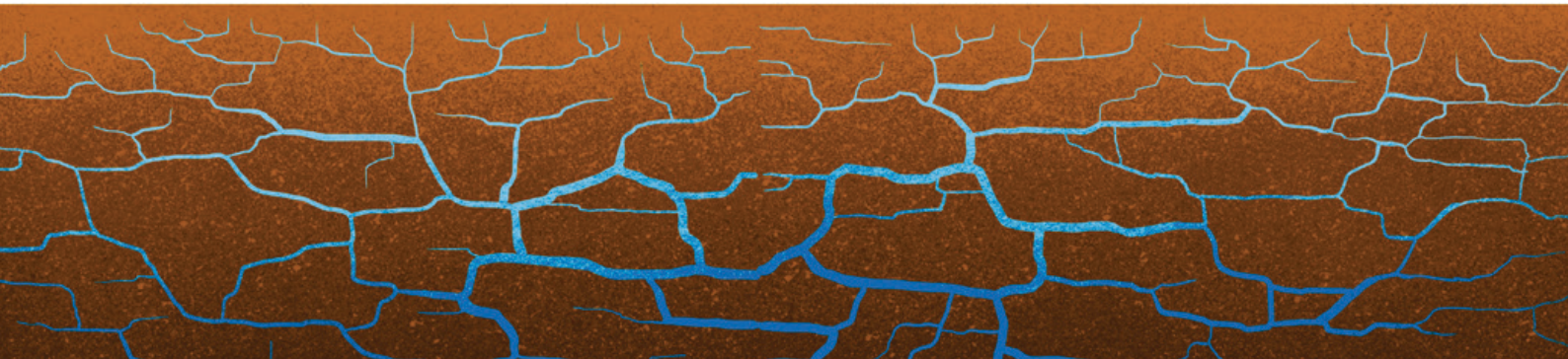
Les organismes de bassins fluviaux se penchent rarement sur la situation des eaux souterraines, en raison, d'une part, d'un manque de connaissances et de capacités dans l'évaluation des aquifères ; de l'autre, d'une séparation institutionnelle historique entre eaux de surface et eaux souterraines. En conséquence, la planification au niveau des bassins fluviaux reste incomplète. Dans plusieurs régions du monde néanmoins, une coopération a vu le jour, laissant présager l'émergence de bonnes pratiques, modelées sur les approches utilisées dans la gestion des bassins fluviaux transfrontaliers (projet Gouvernance des ressources en eaux souterraines, 2016c).

Chapitre 3

Eaux souterraines et agriculture

FAO
Matthew England

IWMI
Karen Villholth



3.1 Introduction

Ce chapitre donne un aperçu du rôle des eaux souterraines dans l'agriculture, le secteur le plus important en termes d'utilisation de cette ressource au niveau mondial. La croissance de la population et des revenus entraînant une demande de production alimentaire plus intensive et à plus forte valeur ajoutée, pour laquelle les eaux souterraines sont bien adaptées, l'agriculture irriguée, l'élevage et les utilisations industrielles connexes, y compris la transformation des aliments, deviennent de plus en plus dépendants de cette ressource (FAO, 2020).

3.2 Utilisation des eaux souterraines dans le secteur agricole

3.2.1 Importance des eaux souterraines pour l'agriculture

Les eaux souterraines sont une ressource essentielle à l'agriculture irriguée, l'élevage et d'autres activités agricoles telle la transformation des aliments. En 2018, on évaluait les prélèvements annuels d'eaux souterraines à près de 978 km³ pour tous les secteurs, y compris celui de l'agriculture (Aquastat, n.d. ; Eurostat, n.d. ; Margat et Van der Gun, 2013). Environ 70 % des extractions d'eaux souterraines dans le monde, et bien plus encore dans les régions arides et semi-arides (Margat et Van der Gun, 2013), sont destinés à la production agricole d'aliments et de fibres, au bétail et aux cultures industrielles (FAO, 2020). On estime que 38 % des terres équipées pour l'irrigation ont recours aux eaux souterraines (Siebert et al., 2013). Plus largement, l'agriculture irriguée est responsable de 70 % des extractions d'eau douce (FAO, 2020) et d'environ 90 % de toute l'évaporation de l'eau (Hoogeveen et al., 2015). L'utilisation d'eau pour la transformation des aliments est également importante, représentant jusqu'à 5 % de la consommation mondiale d'eau (Boretti et Rosa, 2019). Ces chiffres soulignent le fait que la production alimentaire est, dans son ensemble, très gourmande en eau.

Les eaux souterraines sont une ressource essentielle à l'agriculture irriguée, l'élevage et d'autres activités agricoles telle la transformation des aliments

L'extraction d'eaux souterraines a joué un rôle majeur dans l'accélération de la production alimentaire depuis les années 70 (FAO, 2020 ; Shah et al., 2007), notamment dans les zones semi-arides et arides dont les précipitations sont faibles et les eaux de surface, limitées. Elle a aussi permis le développement d'économies locales et régionales qui dépendent de ces eaux pour leur subsistance, leur croissance et leur sécurité alimentaire.

Afin de répondre aux besoins hydrauliques et agricoles mondiaux d'ici à 2050, y compris à une augmentation d'environ 50 % de la demande en denrées alimentaires, en aliments pour animaux et en biocarburants par rapport à 2012 (FAO, 2017), il est indispensable d'accroître la productivité agricole grâce à l'intensification durable des extractions d'eaux souterraines tout en réduisant l'impact de la production agricole sur l'eau et l'environnement, grâce à l'agroécologie par exemple (Snapp et al., 2021) et à de meilleurs politiques alimentaires et instruments économiques (FAO, 2021).

Afin de saisir les impacts divers et dynamiques de l'emploi des eaux souterraines dans l'agriculture à travers le monde, on recense quatre types de socioécologies (Shah et al., 2007) :

- Les systèmes agricoles arides, comme au Moyen-Orient et en Afrique du Nord, où les demandes en eaux souterraines s'accroissent pour des utilisations non agricoles à plus forte valeur ajoutée ;
- Les systèmes agricoles industriels, tels que ceux existant en Australie, en Europe et dans l'ouest des États-Unis, où les eaux souterraines alimentent une agriculture commerciale de précision[5] et attirent des financements relativement élevés pour leur gestion ;

[5] L'agriculture de précision implique l'utilisation des technologies de l'information et de la communication, notamment des systèmes de positionnement global, des satellites, des drones, des capteurs et des images aériennes qui fournissent aux agriculteurs des informations sur chaque site afin de leur permettre de prendre des décisions de gestion (Lowenberg-DeBoer et Erickson, 2019). L'agriculture de précision repose sur la capacité de détermination de l'état des sols et des cultures, dans le but notamment de réduire les impacts sur la faune et l'environnement. Bien que très présents dans les pays à revenu élevé, certains outils de précision ont un fort potentiel pour les pays à faible revenu. Nombre de ces applications sont réservées à l'agriculture à grande échelle, mais il existe également des moyens d'en bénéficier pour les petits agriculteurs (FAO, 2020).

- Les systèmes des petits exploitants agricoles tels qu'en Asie du Sud et, de plus en plus, en Asie du Sud-Est ainsi que dans la Grande plaine de Chine du Nord où l'irrigation par les eaux souterraines est un recours pour 1 à 1,2 milliard d'agriculteurs, pour la plupart pauvres ;
- Le pastoralisme extensif alimenté par les eaux souterraines comme dans une grande partie de l'Afrique subsaharienne et de l'Amérique latine.

Partout où il en existe une source pérenne et fiable, y compris dans les zones auparavant pluviales, les eaux souterraines peu profondes ont constitué, et continuent de constituer, une ressource précieuse pour les petits exploitants agricoles. (Villholth, 2013a ; Shah, 2009 ; Giordano, 2006). Elle représente une source d'eau locale, pérenne, relativement accessible et adaptable pour les pratiques agricoles, ce qui permet une réduction de la pauvreté, une meilleure sécurité alimentaire et une amélioration des moyens de subsistance. Les données recueillies en Asie, il y a deux décennies, montrent qu'en comparaison des grands projets d'irrigation par canaux, la multiplication des accès aux nappes souterraines a favorisé une plus grande équité entre les personnes, les classes, les sexes et les régions par rapport à l'accès à l'irrigation (Shah et al., 2007 ; Deb Roy et Shah, 2003 ; Van Koppen et al., 2002). Des études menées en Afrique, en Asie et en Amérique latine ont montré que lorsque les agriculteurs pauvres tentent d'améliorer leurs moyens de subsistance en pratiquant de petites activités agricoles ou l'élevage à échelle réduite, ils ont souvent recours aux eaux souterraines et à de petites pompes, ce qui est profitable aux femmes en particulier (Villholth, 2013a ; Shah et al., 2007; Van Koppen, 1998).

3.2.2 Comparaison entre régions de l'irrigation à partir des eaux souterraines

La superficie des terres équipées pour l'irrigation (y compris sous contrôle total, en zones humides équipées et par épandage) a plus que doublé depuis les années 60, passant de 139 millions d'hectares en 1961 à 325,1 millions d'hectares en 2013 (tableau 3.1). Les différences d'étendue des surfaces irriguées sont prononcées entre régions. L'Asie, principalement l'Asie du Sud et de l'Est, représente 72 % de la superficie mondiale équipée pour l'irrigation et 41 % de sa surface cultivée est irriguée. C'est en Afrique subsaharienne que l'irrigation est la moins développée : la surface irriguée représente 3,4 % des surfaces cultivées de la région alors qu'elle en représente 41 % en Asie occidentale. Les régions qui dépendent fortement des eaux souterraines pour l'irrigation sont notamment l'Amérique du Nord et l'Asie du Sud, où 59 % et 57 % des surfaces équipées utilisent des eaux souterraines respectivement, alors qu'en Afrique du Nord, cette proportion est de 35 % et en Afrique subsaharienne, de seulement 5 % (voir section 8.1.3).

3.2.3 Comparaison entre pays de l'irrigation à partir d'eaux souterraines

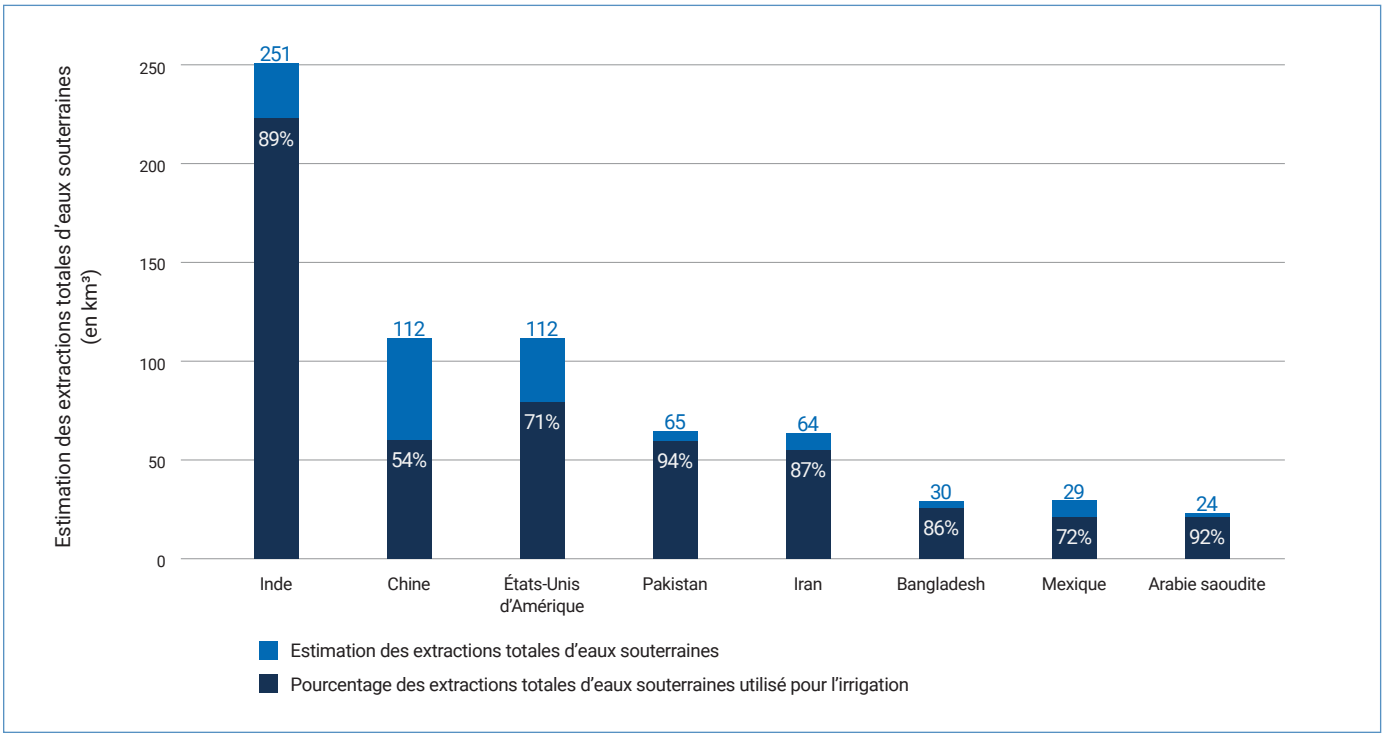
Les pays ayant la plus grande superficie irriguée sont la Chine (73 millions d'hectares), l'Inde (70 millions d'hectares), les États-Unis (27 millions d'hectares) et le Pakistan (20 millions d'hectares) (Aquastat, n.d.). Sur la totalité des extractions d'eau souterraine, la part utilisée pour l'irrigation varie considérablement dans ces pays. L'Inde, le plus grand utilisateur d'eau souterraine dans le monde avec une extraction estimée à 251 km³ par an, utilise 89 % de l'extraction d'eau souterraine pour l'irrigation. La Chine est relativement moins dépendante des eaux souterraines avec, est-il estimé, 54 % de l'extraction totale allant à l'irrigation en moyenne, mais avec des disparités géographiques significatives, la Grande plaine du nord de la Chine (voir section 8.4.4) étant la région la plus dépendante des eaux souterraines par rapport aux régions du sud (Liu et al., 2010). D'autres pays tels le Bangladesh, l'Iran, le Mexique, le Pakistan, l'Arabie saoudite et les États-Unis sont également fortement tributaires des eaux souterraines pour l'irrigation dont la part, dans les quantités extraites, va de 71 à 94 % (Margat et Van der Gun, 2013) (figure 3.1).

Tableau 3.1 Superficies irriguées dans chaque région et dans le monde, avec la part des eaux souterraines utilisée

Continent et région	Superficie totale équipée pour l'irrigation à partir d'eaux de surface ou d'eaux souterraines (Mha) (Faostat 1961-1996 ; Aquastat 1997-2013)		Superficie irriguée en % de la surface totale cultivée (Faostat)		Irrigation par eaux souterraines (2013) (Aquastat)	
Année	**1961**	**2013**	**1961**	**2013**	**Superficie équipée (Mha)**	**% de la superficie totale irriguée**
Afrique	**7,4**	**15,6**	**4,4**	**5,8**	**2,9**	**19,2**
Afrique du Nord	3,9	7,4	17,1	25,6	2,5	34,6
Afrique subsaharienne	3,5	8,2	2,4	3,4	0,4	5,4
Amériques	**22,7**	**52**	**6,7**	**13,1**	**23,7**	**45,5**
Amérique centrale et Caraïbes	17,4	1,7	6,7	13	0,6	33,8
Amérique du Nord	0,6	34,3	5,5	14,9	20,1	58,7
Amérique du Sud	4,7	16	6,8	10,5	3	18,5
Asie	**95,6**	**232,6**	**19,6**	**40,9**	**89,7**	**38,7**
Asie centrale	9,6	13,2	16,2	28,5	1,1	8
Asie de l'Est	7,2	73,9	13,4	56	21,3	28,9
Asie du Sud	36,3	98,0	19,1	45,7	55,5	56,6
Asie du Sud-Est	34,5	22,8	29,7	20,7	0,6	4,6
Asie de l'Ouest	8	24,7	11,7	40,6	11,2	45,2
Europe	**12,3**	**21,4**	**3,6**	**7,3**	**7,1**	**14**
Europe de l'Est et Fédération de Russie	8,7	4,8	5,8	3,6	0,25	10,1
Europe occidentale et Europe centrale	3,6	16,6	1,9	13,5	6,8	40,7
Océanie	**1,1**	**3,2**	**3,2**	**6,8**	**0,8**	**24,9**
Australie et Nouvelle-Zélande	1,1	3,2	3,2	6,9	0,8	24,9
Îles du Pacifique	0,001	0,004	0,2	0,6	0,000 4	10
MONDE	**139,1**	**324,8**	**10,2**	**20,6**	**124,1**	**38,4**

Source : données issues d'Aquastat (n.d.) et Faostat (n.d.).

Figure 3.1 Estimations des extractions totales d'eau souterraine et du pourcentage utilisé pour l'irrigation dans certains pays en 2010



Source : sur la base des données de Margat et Van der Gun (2013).

3.2.4 La portée d'un utilisation combinée de l'eau

L'utilisation combinée[6] des eaux souterraines et des eaux de surface en agriculture est importante. Elle permet généralement l'intensification des cultures dans les zones existantes d'irrigation par eaux de surface, comme en Asie du Sud, où elle permet des cultures pérennes et le contrôle de la salinité (Shah, 2009). L'évolution de l'utilisation combinée ne fait pas, en général, l'objet d'une gestion ou d'une planification particulières mais relève plutôt d'un mécanisme d'adaptation pour les agriculteurs lorsque les systèmes d'eaux de surface en place ne parviennent pas à garantir un accès pérenne à l'eau douce. Il est peu rendu compte, de façon régulière, de l'utilisation combinée (Siebert et al., 2010), mais les données de recensement recueillies aux États-Unis (Dieter et al., 2018), en Chine et en Inde (Evans et Dillon, 2018 ; Ministère indien des ressources en eau, 2017) indiquent une expansion continue.

3.2.5 Contribution économique des eaux souterraines à l'agriculture

La contribution économique des eaux souterraines à l'agriculture a été estimée à environ 210-230 milliards de dollars EU par an dans le monde, avec une productivité brute de 0,23 à 0,26 dollar EU par mm³ prélevé (Shah et al., 2007). La productivité hydraulique, en termes de rendement des cultures par unité d'eau déversée, est généralement jusqu'à deux fois plus élevée pour les eaux souterraines par rapport aux eaux de surface. Cela est principalement dû au fait que les eaux souterraines sont disponibles à la demande, sont proches des champs et sont généralement autogérées. Fort de cet avantage, les agriculteurs peuvent investir davantage dans d'autres intrants agricoles comme les engrais, les pesticides et les semences, ce qui rend leurs activités agricoles plus attrayantes, plus lucratives et moins risquées (Bierkens et al., 2019 ; Smilovic et al., 2015 ; Shah, 2007). Toutefois, la contribution économique globale et la productivité hydrographique de l'agriculture peuvent sembler faibles par rapport à d'autres secteurs d'emploi de l'eau en raison de la combinaison d'une consommation d'eau relativement élevée par unité de production et des prix bas des produits agricoles. Dans un contexte de croissance économique et d'urbanisation accrue, cela se traduit souvent par le fait que l'agriculture doit renoncer à l'eau au profit d'utilisations urbaines et industrielles en raison de la valeur ajoutée généralement plus élevée par unité d'utilisation de l'eau de celles-ci (Molle et Berkoff, 2009).

3.2.6 Les eaux souterraines à destination de l'élevage

Les volumes d'eau souterraine utilisés pour abreuver le bétail[7] sont faibles en comparaison des volumes utilisés pour irriguer les cultures fourragères destinées à l'alimentation du bétail (Shah et al., 2007). La production irriguée de fourrage compte pour 98 % de l'eau (de surface et souterraine) employée pour le bétail, les 2 % restants étant utilisés pour la boisson et le refroidissement (Mekonnen et Hoekstra, 2012). On estime qu'environ 264 km³ d'eaux de surface et d'eaux souterraines sont utilisés annuellement dans le monde pour la production de fourrage, ce qui correspond à un cinquième du volume total d'eau consommée par l'agriculture et moins d'un tiers de l'eau utilisée pour les cultures vivrières (Heinke et al., 2020).

Les parcours sous forme de prairies et de pâturages permanents gérés par l'homme, essentiellement irrigués de façon pluviale, couvrent près de 33 millions de km² de la surface terrestre, soit environ 70 % de toutes les terres agricoles (Faostat, n.d.). Le nombre total de têtes de bétail a plus que triplé, passant de 7,3 milliards en 1970 à 24,2 milliards en 2011 (FAO, 2018a). L'intensification de l'élevage animal est associée à une concentration des besoins en aliments et en eau, notamment dans l'agriculture industrielle, souvent associée à une intensification de la pression sur les terres et les ressources en eau *in-situ*, notamment pour la culture fourragère irriguée dans des exploitations à stabulation permanente (IPES-Food, 2018).

---

[6] L'utilisation combinée de l'eau désigne l'utilisation combinée des eaux de surface et des eaux souterraines pour satisfaire les besoins en eau des cultures (Shah et al., 2006).

[7] Le terme « bétail » est utilisé dans un sens large pour désigner tous les animaux domestiques, quels que soient leur âge, le lieu où ils vivent ou le but de leur élevage. Les animaux non domestiques sont exclus de cette catégorie, sauf s'ils sont gardés ou élevés en captivité. Le bétail comprend les grands et petits quadrupèdes, la volaille, les insectes (abeilles) et les larves d'insectes (vers à soie) (FAO, 2018a).

De nombreux parcours arides et semi-arides dépendent entièrement de l'accès aux eaux souterraines pour abreuver le bétail. Les structures de puits d'eaux souterraines favorisent des taux de stockage supérieurs à la capacité de charge des parcours en termes de végétation naturelle pour le pâturage et concentrent également le bétail autour des puits de forage. La viabilité environnementale des parcours est susceptible d'être gravement perturbée par la création de forages équipés de pompes électriques (Shah et al., 2007). En Somalie et dans le nord du Kenya, les forages ont amélioré la sécurité hydrique tout en encourageant le surpâturage, ce qui a entraîné des conflits autour des droits à l'eau et aux pâturages ainsi que l'exclusion des communautés vulnérables (Gomes, 2006).

Le pastoralisme joue un rôle essentiel pour maintenir les moyens de subsistance d'une grande partie des habitants d'Afrique subsaharienne (Giordano, 2006). Si l'extraction des eaux souterraines peut être moins intensive dans les parcours pour bétail, la dégradation des terres due à l'élevage peut avoir des impacts considérables sur la recharge des nappes souterraines et la qualité de ces dernières (Meglioli et al., 2013).

3.3 Impacts de l'agriculture sur le volume des eaux souterraines

3.3.1 L'épuisement des nappes souterraines dû à l'irrigation

L'épuisement des nappes souterraines est souvent attribué aux prélèvements par l'agriculture. Cet épuisement entraîne une multitude de conséquences, notamment l'assèchement des zones humides et des cours d'eau tributaires des eaux souterraines par la réduction des débits de base (voir chapitre 6) et le compactage des couches terrestres compressibles, résultant en l'affaissement des sols, la migration descendante des eaux souterraines de faible qualité et des intrusions salines dans les aquifères et les systèmes d'eaux de surface situés le long des plaines côtières.

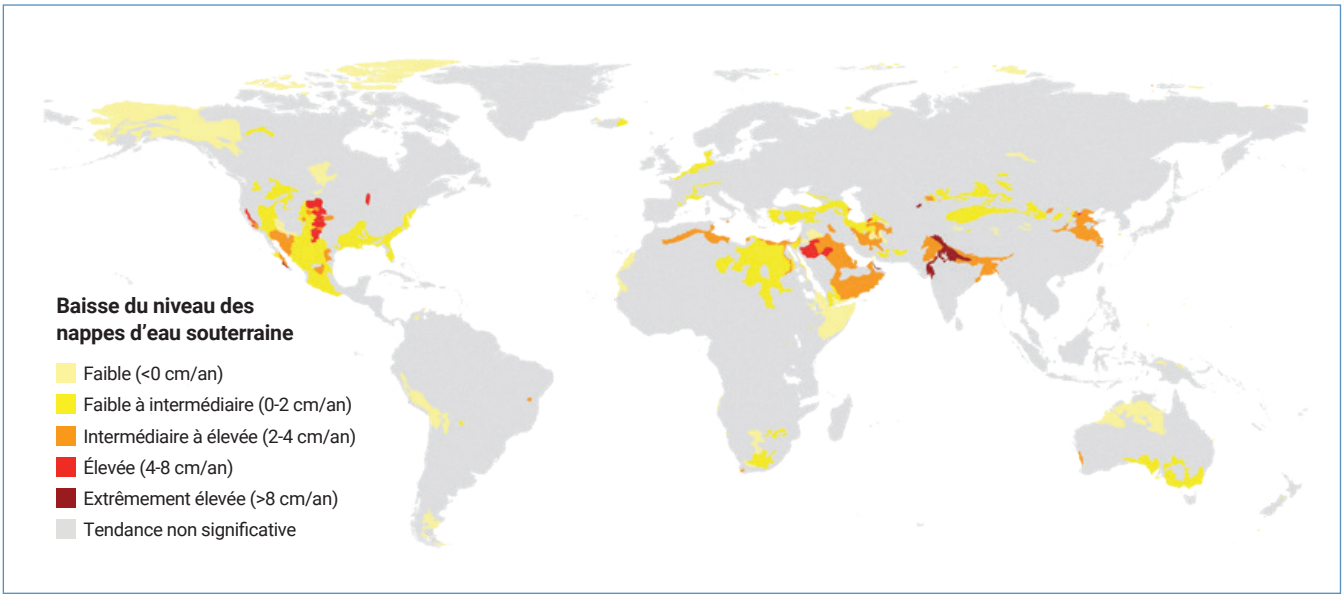
Les observations terrestres et les données satellitaires ont montré, ou rendu plausible, le fait que de nombreux aquifères sont exploités à un rythme qui induit leur épuisement rapide de même que des conséquences sociales et environnementales. Une partie des trente sept principaux systèmes aquifères du monde sont concernés (Konikow, 2011 ; Gleeson et al., 2012 ; Scanlon et al., 2012a ; Richey et al., 2015 ; Gong et al., 2018 ; Shamsudduha et Taylor, 2020) (figure 3.2). Les taux d'extraction élevés pour l'agriculture irriguée se trouvent principalement dans les régions arides et semi-arides, où la croissance démographique et l'expansion des zones irriguées ont entraîné une croissance rapide des besoins en eau. L'exploitation des eaux souterraines est motivée par des facteurs de stimulation par l'offre telle que la capacité à fournir une irrigation flexible et adaptable à la demande, propice à une agriculture génératrice de richesse (Shah et al., 2007 ; Gleeson et al., 2012), et par la facilité d'obtention de pompes, de technologies de forage et d'énergie à bas coût, souvent complétée par des programmes d'aide et de subventions gouvernementaux. Les facteurs de stimulation par la demande ont également eu une influence, laquelle découle de la nécessité de fournir plus de nourriture à des populations urbaines et rurales croissantes.

L'épuisement incontrôlé des nappes souterraines au sein des zones agricoles devient un problème de plus en plus préoccupant aux niveaux régional et mondial

L'épuisement le plus notable dû aux extractions agricoles se produit dans les aquifères continentaux associés aux plaines et aux marges côtières. L'épuisement localisé des aquifères mineurs alluviaux, côtiers, deltaïques et insulaires (qui ne sont pas représentés dans la figure 3.2) peut également s'expliquer partiellement par les extractions agricoles, ce qui entraîne une pénurie et une pollution des eaux souterraines ainsi que des intrusions salines, qui menacent l'approvisionnement en eau potable et limitent la production agricole (Margat et Van der Gun, 2013).

Les aquifères qui sont isolés d'une recharge contemporaine, notamment lorsqu'ils sont situés dans des zones arides dépendant des eaux souterraines, constituent des cas particuliers et particulièrement alarmants d'épuisement étant donné que les eaux stockées, lorsqu'elles sont extraites, le sont définitivement tandis que l'aquifère ne reçoit

Figure 3.2 Baisse du niveau des nappes souterraines dans certains des principaux aquifères du monde



Note : La baisse du niveau de la nappe souterraine indique la baisse annuelle moyenne de son niveau sur la période d'étude (1990-2014).

Source : WRI (2019). Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

aucune recharge naturelle ou seulement une recharge insignifiante sous le climat actuel (Bierkens et Wada, 2019) (encadré 3.1). Ces aquifères non renouvelables, dont le taux de recharge est négligeable à l'échelle de temps humaine, nécessitent des stratégies à long terme de planification de l'épuisement, stratégies pour lesquelles des mesures de substitution visant à garantir un approvisionnement en eau de base et une transformation de l'économie pour la rendre moins dépensière en eau sont essentielles. La période sur laquelle ces objectifs doivent être atteints est un paramètre de planification essentiel, qui est soumis toutefois à une grande incertitude étant donné que la capacité de stockage absolue et la viabilité économique de l'extraction de l'eau des aquifères finis sont incertaines (Foster et Loucks, 2006). De nombreuses sections des aquifères renouvelables sont probablement soumises de même à un épuisement irréversible, car il est impossible qu'ils puissent être alimentés par recharge naturelle ou même par recharge mécanique. Ceci peut être dû au tassement et à l'affaissement des aquifères, ou parce que le remplissage naturel de l'aquifère est impossible en raison de la durée prolongée qui serait nécessaire, sans parler des ressources en eau externes nécessaires pour les recharger artificiellement.

L'épuisement incontrôlé des nappes souterraines au sein des zones agricoles devient un problème de plus en plus préoccupant aux niveaux régional et mondial, car il menace de compromettre la sécurité alimentaire, l'approvisionnement de base en eau, l'intégrité environnementale et la résilience au changement climatique. Ce problème épineux est loin d'être résolu étant donné qu'il faudrait pour ce faire plus de capacités de gestion et de gouvernance à de multiples niveaux intégrés et au sein des approches intersectorielles (OCDE, 2016) (voir chapitres 2, 11 et 12).

Des modélisations de nappes souterraines, qui intègrent les changements d'emploi des terres et les estimations de prélèvements et de recharge, sont utilisées pour suivre leur épuisement (Konikow, 2013). Vérifier l'échelle et la magnitude de l'évolution de l'épuisement à l'aide de systèmes de télédétection qui mesurent les variations des volumes de stockage dans la croûte terrestre, grâce à la mission satellite GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) de la NASA, reste délicat (Famiglietti, 2014). Cela est dû en grande partie à la résolution visuelle insuffisante des

Encadré 3.1 Épuisement des eaux souterraines en Égypte

Au cours des dix dernières années, on remarque une évolution notable : la prolifération de forages de grande capacité et de grande efficacité, susceptibles d'atteindre des nappes souterraines à des centaines de mètres de profondeur. L'Égypte a commencé l'exploitation intensive des eaux souterraines pour l'irrigation dans les années 1960 au travers du projet New Valley destiné à exploiter les ressources en eaux souterraines non renouvelables du système aquifère des grès nubiens (NSAS) dans le désert occidental du pays (Powell et Fensham, 2016). D'autres projets et plans ultérieurs ont accéléré le rythme d'expansion de l'irrigation alimentée par l'extraction intensive d'eau souterraine. Par exemple, le projet Developing Southern Egypt, 1997-2017, prévoyait la création de 216 000 hectares de surfaces irriguées dans la zone de Toshka au sud-est du désert occidental. Le projet utilisait les eaux de surface provenant du Nil et les eaux souterraines de l'aquifère des grès nubiens par le biais de forages atteignant une profondeur de 200 à 1 200 mètres. De 1997 à 2006, les niveaux des nappes souterraines ont chuté de jusqu'à 13,8 mètres dans certaines parties de l'aquifère. Il est prévu d'irriguer 10 500 hectares supplémentaires uniquement à partir des eaux souterraines par le biais d'une cinquantaine de puits de forage, ce qui devrait entraîner une nouvelle baisse de 15 mètres du niveau des nappes souterraines (Sharaky et al., 2018). Les expressions de surface de l'aquifère, sous la forme de sources artésiennes en milieu désertique et d'oasis, sont désormais compromises en raison de cette intensification de l'emploi de l'eau et des terres, et ce bien qu'il ait permis le développement de civilisations anciennes et la survie de beaucoup (Powell et Fensham, 2016).

anomalies gravitationnelles utilisées pour déduire les variations des volumes de stockage (Vishwakarma et al., 2021). Les estimations par modélisation suggèrent qu'entre 2000 et 2009, l'épuisement mondial des nappes souterraines, tous usages confondus, était de l'ordre de 113 km³ par an (Döll et al., 2014) tandis que d'autres modélisations avancent des volumes de l'ordre de 304 km³ par an pour 2010, dont environ 75 % attribuables à l'agriculture (Dalin et al., 2017 ; Wada, 2016). En pratique, la quantification de l'épuisement du stockage des aquifères à l'échelle mondiale reste conjecturale, étant donné que les conditions aux limites, les conditions de recharge et d'écoulement évoluent. Cependant, les modélisations incluent de plus en plus la mesure des hauteurs piézométriques comme indicateur précieux des variations de stockage, ce qui apporte plus de certitude dans les estimations de l'épuisement des aquifères locaux et régionaux (Haacker et al., 2016).

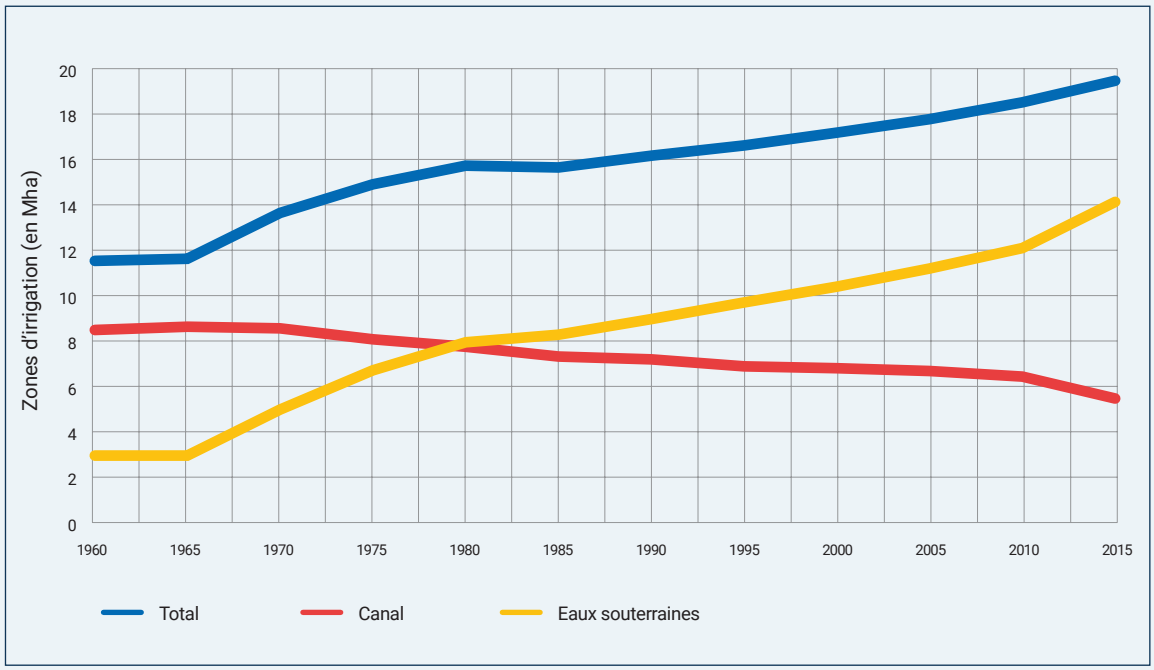
Il est de plus en plus reconnu que l'eau virtuelle contenue dans les produits de cultures et leur redistribution mondiale via le commerce international est essentielle à la compréhension et la gestion de niveaux d'extraction de l'eau viables à l'échelle mondiale (chapitre 1). On estime qu'environ 11 % (soit 25 km³ par an) de l'épuisement des nappes souterraines mondiales contribue au commerce international des récoltes (Dalin et al., 2017), qui aide à la sécurité alimentaire et à la croissance économique mais participe également, de manière significative, à l'épuisement à grande échelle des aquifères situés sous les terres fertiles. Le blé, le maïs, le riz, la canne à sucre, le coton et le fourrage sont les principales cultures contribuant à l'épuisement des eaux souterraines. Ces cultures font également l'objet d'un commerce important, ce qui se traduit par des empreintes hydriques extrêmement peu durables[8] (dont les eaux souterraines représentent une part importante) du fait de l'exportation intensive de récoltes destinées à la production d'aliments, de fourrage et de fibres pour les humains et le bétail (Mekonnen et Gerbens-Leenes, 2020). Cinq pays sont responsables d'environ 70 % de l'empreinte hydrique non durable : la Chine, l'Inde, l'Iran, le Pakistan et les États-Unis. Sur la totalité de l'empreinte hydrique non durable, 90 % sont dues aux cultures vivrières et fourragères tandis que 10 % sont dues aux cultures de fibres, au caoutchouc et au tabac (Mekonnen et Gerbens-Leenes, 2020).

[8] L'empreinte hydrique est considérée comme « non durable » si elle est supérieure à la quantité d'eau bleue renouvelable disponible et si elle viole les exigences en matière de flux environnementaux (Mekonnen et Gerbens-Leenes, 2020).

Encadré 3.2 Quand les terres agricoles irriguées par eaux de surface disposent d'une nappe phréatique : l'exemple du Pakistan

L'aquifère du bassin de l'Indus, au Pakistan, contient au moins quatre-vingts fois le volume d'eau douce des trois plus grands barrages du pays. Pourtant, le pays est au bord d'une grave crise en eau souterraine (Lytton et al., 2021). Le Pakistan est le quatrième plus grand utilisateur d'eaux souterraines, ayant été responsable, en 2010, de 6,6 % et, en 2017, de 6,4 % de toutes les extractions d'eaux souterraines dans le monde (Margat et Van der Gun, 2013 ; Aquastat, n.d.), tout en abritant 4,6 % de la superficie totale des zones irriguées par des eaux souterraines dans le monde (Bhutta et Smedema, 2007). L'utilisation extensive des eaux souterraines dans le pays a commencé dans les années 60, lorsque de grands puits de drainage ont été installés dans le cadre de projets de contrôle et de récupération de la salinité (SCARP), financés par le gouvernement pour contrôler les problèmes d'engorgement et de salinité sur 2,6 millions d'hectares de terres irriguées, en particulier dans la province du Punjab (Qureshi, 2020). Au fil du temps, les agriculteurs ont eu de plus en plus recours à l'utilisation des nappes phréatiques peu profondes comme moyen d'étendre les zones irriguées, d'accroître la production agricole et d'augmenter leurs revenus tout en faisant face aux sècheresses. Un accès plus sûr à l'eau a permis d'augmenter de 50 à 100 % le rendement des cultures. En 1980, les zones irriguées par eau souterraine sont devenues plus importantes que les zones irriguées par eau de surface (voir le graphe ci-dessous), tandis qu'une part importante des terres cultivées est en réalité irriguée en combinant les deux afin notamment de contrôler la salinité généralement plus élevée des eaux souterraines. En soixante ans, le Pakistan, qui était un pays dépendant des eaux de surface, est devenu un pays dépendant des eaux souterraines. Après avoir bénéficié d'excédents d'eaux souterraines, il connaît aujourd'hui d'importants problèmes dus à l'extraction excessive d'eaux souterraines, exacerbés par des problèmes croissants de salinité provoqués par l'emploi d'eaux souterraines de mauvaise qualité pour l'irrigation. Environ 21 % des surfaces irriguées sont salines, ce qui menace la sécurité alimentaire du pays, les terres irriguées étant responsables de plus de 90 % de la production nationale totale de céréales (Qureshi, 2020).

Évolution historique des zones irriguées par eaux souterraines et eaux de surface au Pakistan



Source : Qureshi (2020, fig. 4, p. 6).

3.4 Les terres agricoles disposant de nappes phréatiques peu profondes

Les nappes phréatiques peu profondes peuvent présenter à la fois des opportunités et des contraintes pour les cultures. D'une part, les nappes phréatiques peu profondes peuvent être problématiques pour l'agriculture en raison du risque d'engorgement résultant des précipitations ou de l'irrigation dans les zones où le drainage naturel ou artificiel est insuffisant. Cela peut conduire à une salinisation progressive des sols, notamment dans les régions sèches. D'autre part, les nappes phréatiques contrôlées peu profondes peuvent favoriser l'agriculture, car elles assurent une disponibilité permanente de l'eau qui permet d'optimiser les rendements des cultures, même pendant les périodes sèches prolongées. Dans toute l'Afrique et l'Asie, les petits exploitants agricoles dépendent de nappes souterraines peu profondes, saisonnières et pérennes pour leurs cultures (Pavelic et al., 2013 ; Pavelic et al., 2012 ; Shah, 2009).

Alors que la plupart des zones arides et semi-arides habitées du monde, y compris les zones qui jouissaient autrefois d'une bonne dotation en eau (encadré 3.2), connaissent aujourd'hui un épuisement des nappes souterraines, il est prouvé que d'autres régions, l'Europe du Nord par exemple, seront confrontées, selon les scénarios climatiques actuels, à une accumulation nette d'eaux souterraines, de manière saisonnière ou sur plusieurs années, du fait de périodes plus longues de précipitations supérieures à la normale, pouvant entraîner des engorgements et des inondations. Cet état de fait peut poser des problèmes importants pour l'agriculture et nécessite une gestion proactive des nappes phréatiques, comme c'est le cas au Royaume-Uni (Macdonald et al., 2008). Les Pays-Bas sont naturellement sujets aux inondations et gèrent constamment le niveau des nappes souterraines par le biais du drainage artificiel et du pompage (Zeeberg, 2009). Dans de vastes zones des Pays-Bas, les nappes phréatiques sont l'objet de contrôles depuis des siècles, ce qui a permis de maintenir leurs niveaux proches des niveaux optimaux pour les cultures et la végétation. De même, d'autres pays de faible altitude comme le Danemark dépendent d'un important drainage artificiel souterrain par canalisations dans les régions au sol argileux, drainage qui permet de contrôler le niveau des nappes souterraines et de maintenir l'état du sol et les conditions de culture opérables tout en protégeant les infrastructures, notamment les routes (Kidmose et al., 2013).

3.5 Impacts de l'agriculture sur la qualité des eaux souterraines

3.5.1 La pollution des eaux souterraines d'origine agricole

La pollution agricole est aujourd'hui considérée comme le principal facteur de dégradation des eaux continentales et côtières, dépassant les pollutions provenant des établissements humains et des activités industrielles (FAO, 2018a). Les principaux polluants issus de l'agriculture sont les nutriments, les pesticides, les sels, les sédiments, le carbone organique, les pathogènes, les métaux et les résidus médicamenteux. Les nitrates contenus dans les engrais chimiques et biologiques figurent au premier rang des contaminants anthropiques les plus répandus dans les eaux souterraines du monde entier (FAO, 2018a), entraînant notamment l'eutrophisation des eaux de surface (Smolders et al., 2010). Au sein de l'Union européenne, 38 % des masses d'eau subissent une pression importante due à la pollution agricole (WWAP, 2015) ; aux États-Unis, l'agriculture est la principale source de pollution des rivières et en Chine, l'agriculture est responsable d'une grande partie de la pollution des eaux de surface et des eaux souterraines par l'azote (FAO, 2013).

Les différents types de pesticides couramment utilisés en agriculture comprennent les insecticides, les herbicides et les fongicides (Schreinemachers et Tipraqsa, 2012). Lorsqu'ils sont mal utilisés ou éliminés, ils peuvent polluer les sols et les ressources en eau avec des substances cancérigènes et d'autres substances toxiques, tandis que leurs produits de dégradation peuvent être dangereux pour la biosphère terrestre et aquatique ainsi que pour la santé humaine (Tang et al., 2021 ; Sharma et al., 2019). Le marché mondial des pesticides possède une valeur annuelle de plus de 35 milliards de dollars EU (FAO, 2018a). On connait moins bien la contamination par micropolluants organiques,

comme les pesticides, des zones agricoles dans les économies émergentes. Toutefois, lorsque le problème a été étudié au sein d'environnements socio-économiques vulnérables où l'agriculture est intensive, les résultats ont montré la présence de contaminants en concentrations excessives (Wentworth et al., 2021), ce qui est indicateur d'un risque environnemental et sanitaire émergent majeur.

L'accumulation excessive de sel dans les eaux souterraines du fait d'un drainage saumâtre et d'intrusions d'eau de mer (Mateo-Sagasta et Burke, 2010) a augmenté avec l'expansion de l'irrigation, davantage aggravée par le changement climatique. L'irrigation peut entraîner les sels accumulés dans les sols des terres arides, qui sont ensuite transportés par les eaux de drainage vers les aquifères et autres nappes d'eau réceptrices (FAO, 2018a). On a signalé d'importants problèmes de salinité de l'eau dans les terres agricoles en Argentine, en Australie, en Chine, en Inde, au Pakistan, au Soudan, aux États-Unis et dans de nombreux pays d'Asie centrale (FAO, 2018a ; Shahid et al., 2018 ; Thorslund et Van Vliet, 2020). Selon des estimations, de 20 à 23 % et de 25 à 33 % de la superficie mondiale respective des terres cultivées et irriguées sont salines et ont une productivité agricole réduite (Shahid et al., 2018 ; Jamil et al., 2011), principalement dans les régions arides et semi-arides.

De manière générale, on constate que les lois et les réglementations actuelles visant à prévenir ou à limiter la pollution diffuse des nappes souterraines par les activités agricoles demeurent insuffisantes tout comme leur application

L'utilisation d'antibiotiques pour l'élevage intensif de bétail a augmenté avec la demande croissante de viande au niveau mondial (Manyi-Loh et al., 2018). Dans les pays en développement, elle n'est souvent pas réglementée, la Chine étant le premier producteur et consommateur connu d'antibiotiques pour l'élevage (Maron et al., 2013). Les antibiotiques protègent les animaux des infections, mais ils conduisent également à l'apparition de bactéries qui leur sont résistantes, peuvent être pathogènes pour l'homme et sont très difficiles à traiter (Prestinaci et al., 2015). Celles-ci se retrouvent généralement dans l'environnement, notamment dans les eaux souterraines, par l'intermédiaire des déjections animales. La prévalence généralisée de bactéries résistantes aux antibiotiques a été documentée au niveau mondial (Manyi-Loh et al., 2018), avec des contaminations des eaux souterraines signalées en Chine (Xiao et al., 2016), au Kenya (Wahome, 2013), en Afrique du Sud (Carstens, 2013) et aux États-Unis (Li et al., 2015).

3.5.2 Impacts économiques, sanitaires et environnementaux

Les coûts environnementaux et sociaux de la pollution des eaux de surface et souterraines d'origine agricole dans le monde dépassent, selon les estimations, plusieurs milliards de dollars par an (OCDE, 2012a). Aux États-Unis, la contamination des eaux souterraines par les pesticides et l'eutrophisation des eaux douces ont un coût annuel respectif de 1,6 à 2 milliards et de 1,5 à 2,2 milliards de dollars EU (Pimentel, 2005 ; Dodds et al., 2009). Le coût annuel mondial de la dégradation des terres induite par le sel dans les zones irriguées est estimé à 27,3 milliards de dollars EU en raison de la perte de production agricole (Qadir et al., 2014).

La pollution des eaux souterraines par l'agriculture a des effets directs néfastes sur la santé humaine. Par exemple, des niveaux élevés de nitrates dans l'eau peuvent causer la méthémoglobinémie (syndrome du bébé bleu) chez les nourrissons (Majumdar, 2003 ; Knobeloch et al., 2000). Alors que les normes de qualité de l'eau relatives aux polluants sont généralement plus strictes quand il s'agit de protéger la santé humaine plutôt que l'environnement, les niveaux limites, dans le cas des nitrates, pour protéger les nappes d'eau de l'eutrophisation sont plus faibles que ceux risquant de provoquer la méthémoglobinémie (Hinsby et al., 2008). L'accumulation de pesticides dans l'eau et la chaîne alimentaire, qui a des effets néfastes avérés sur la santé des écosystèmes et des personnes, a conduit la Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants à interdire, en 2001, certains pesticides persistants (tels que le DDT et de nombreux organophosphates) (Tang, 2013). Cependant, un certain nombre de pesticides interdits sont encore utilisés dans les pays les moins avancés ; ils ont des effets aigus et probablement chroniques sur la santé des personnes (Ngowi et al., 2012).

3.5.3 Le contrôle de la pollution dans le secteur agricole

De manière générale, on constate que les lois et les réglementations actuelles visant à prévenir ou à limiter la pollution diffuse des nappes souterraines par les activités agricoles demeurent insuffisantes tout comme leur application (Projet Gouvernance des ressources en eaux souterraines, 2016a). Davantage de progrès ont eu lieu dans l'élaboration de lois et réglementations relatives aux eaux souterraines que dans leur mise en œuvre et leur application effectives, ce qui représente un obstacle majeur à la gestion durable des eaux souterraines. Dans de nombreux pays, les réglementations sont médiocres ou la non-conformité est omniprésente, la pollution des nappes souterraines se poursuivant sans être contrôlée. Les tentatives de régulation de la pollution diffuse par le biais d'amendes pour pollution n'ont pas fonctionné, étant donné qu'il est difficile d'identifier les pollueurs (OCDE, 2017a). Les instruments économiques de lutte contre la pollution des eaux de surface et des eaux souterraines sont de plus en plus employés. Il s'agit notamment de taxes, de « jachères » (le retour des terres agricoles à un usage naturel) et de paiements visant à limiter la production ou l'intensité d'emploi des terres. Les taxes incluent des paiements par les pollueurs, des taxes environnementales spécifiques et des taxes sur les technologies, les productions et les intrants qui ont des effets écologiques néfastes (les pesticides par exemple) en fonction du niveau de risque ou, à l'inverse, des subventions aux technologies respectueuses de l'environnement. Des méthodes de réduction de la pollution ayant fait leurs preuves, tels les « principes pollueur-payeur », sont disponibles par le biais de taxes vertes sur les pesticides et les engrais par exemple, mais elles ne sont pas souvent appliquées et leurs montants ne sont pas assez élevés pour être dissuasifs ou ont des effets distributifs involontaires, étant donné que les agriculteurs les plus pauvres sont plus durement affectés par ces taxes (OCDE, 2017a ; 2011).

Encadré 3.3 Énergie et irrigation en Afrique subsaharienne

L'Afrique subsaharienne se caractérise par des infrastructures énergétiques insuffisantes et un accès à l'électricité limité, qui s'accompagne de faibles niveaux de développement agricole, y compris en termes d'emploi des eaux souterraines. En revanche, le continent jouit de niveaux de disponibilité d'énergie solaire parmi les plus élevés du monde (AIE, 2019a). L'agriculture est largement pluviale, mais en raison de la croissance démographique et du changement climatique, il est de toute évidence nécessaire d'accroître la production alimentaire afin d'assurer la sécurité alimentaire et renforcer la résilience. Les ressources en eaux souterraines de toute la région sont généralement sous-utilisées, de sorte qu'il existe un fort potentiel d'expansion durable de l'agriculture irriguée à petite échelle si le problème de l'accessibilité financière et d'autres contraintes peuvent être surmontés (Altchenko et Villholth, 2015). Le coût des SPIS de petite taille a considérablement diminué ces dernières années et ceux-ci commencent à émerger sur le marché, en particulier en Afrique de l'Est où les distributeurs et les chaînes d'approvisionnement sont mieux établis (Efficiency for Access, 2019). Les pompes à moteur diesel sont moins chères à l'achat mais ont un coût de fonctionnement plus élevé que celui des appareils à énergie solaire, et elles génèrent de fortes émissions de gaz à effet de serre. On prévoit que le mélange d'énergies nécessaire au fonctionnement des petites pompes dans toute la région dépendra de facteurs tels que les cultures choisies ou le prix futur du diesel et des technologies solaires adéquates (Xie et al., 2021). Avec l'augmentation de la demande, une meilleure gouvernance et une cogestion des eaux souterraines et de l'énergie seront nécessaires pour assurer une utilisation durable des ressources.

On considère qu'une combinaison de mesures de lutte contre la pollution, comprenant une réglementation, des incitations économiques ainsi que la diffusion d'informations, des campagnes de sensibilisation et le partage de données, est plus efficace que la seule réglementation (OCDE, 2008). Les politiques relatives à la lutte contre la pollution de l'eau par l'agriculture doivent s'inscrire dans le cadre d'une politique agricole et d'une politique de l'eau globales à l'échelle de chaque pays, de chaque bassin hydrographique et de chaque aquifère.

Les politiques visant à promouvoir l'information et la sensibilisation dans le but de modifier le comportement des agriculteurs et à inciter à l'adoption des meilleures pratiques de gestion (FAO, 2018a) pour l'agriculture sont importantes pour prévenir la pollution à la source (Liu et al., 2018). Par exemple, l'analyse comparative peut favoriser le changement de comportement des agriculteurs en leur montrant les résultats qu'ils obtiennent en comparaison d'autres agriculteurs par rapport à l'emploi d'engrais et de pesticides. La promotion de la responsabilité sociale des entreprises au sein du secteur privé est également préconisée (FAO, 2018a).

3.6 Liens entre les eaux souterraines et l'énergie dans l'irrigation

Il existe un lien étroit entre l'extraction d'eaux souterraines et l'utilisation d'énergie. En Inde, l'électrification des zones rurales a largement contribué à l'exploitation des eaux souterraines (Shah, 2009 ; Smith et Urpelainen, 2016). L'exploitation accrue des nappes souterraines est notable lorsque les réseaux électriques ruraux ont été étendus à des zones qui autrement auraient dépendu de carburant diesel ou de l'énergie éolienne, comme cela a été montré en Éthiopie, au Kenya et en Afrique du Sud (Villholth, 2013a). À l'inverse, les services d'électricité peuvent être confrontés à des pertes de revenus importantes lorsque la baisse du niveau des nappes souterraines et la hausse des coûts d'irrigation entraînent une diminution du pompage, comme cela a été mis en évidence dans le centre des États-Unis (Rhodes et Wheeler, 1996).

Les progrès réalisés dans le domaine des technologies solaires ont permis le développement de systèmes d'irrigation à énergie solaire (SPIS) employés à grande échelle pour les exploitations agricoles, qui peuvent être des opérations commerciales à grande échelle, en Australie par exemple, ou de petites exploitations agricoles dans les zones où les nappes souterraines sont relativement peu profondes, notamment dans les endroits reculés produisant des cultures de grande valeur comme en Afghanistan (FAO, 2018b). La multiplication des SPIS, qu'ils soient connectés au réseau ou non, peut être attribuée à la baisse du coût des panneaux solaires au cours des dix dernières années, en supplément de programmes de subvention gouvernementaux, qui ont fait de cette technologie une option viable, en particulier pour les petits agriculteurs (FAO, 2018b). Les SPIS fournissent une énergie fiable, abordable et respectueuse du climat pour l'irrigation (encadré 3.3). Ces systèmes présentent toutefois un risque d'utilisation non durable des ressources en eau lorsque leur mise en place n'est pas gérée et réglementée de façon adéquate (FAO, 2018b). Une fois les systèmes installés, l'unité d'énergie ne coûte rien et les agriculteurs ne sont donc pas incités à économiser l'électricité pour le pompage des eaux souterraines. Les SPIS peuvent donc entraîner une extraction excessive d'eau souterraine et une faible efficacité d'application sur le terrain. Dans certains cas, les agriculteurs vendent l'eau à leurs voisins en réalisant un bénéfice, ce qui augmente les prélèvements totaux d'eaux souterraines (FAO, 2018b ; Closas et Rap, 2017). La relation qui existe entre les subventions à l'énergie et le pompage des eaux souterraines pour l'irrigation est bien établie avec, par exemple des données recueillies en Inde (Scott et Sharma, 2010) (encadré 3.4), en Iran (Jamali Jaghdani et Kvartiuk, 2021) et au Mexique (Scott, 2013).

Encadré 3.4 Eaux souterraines et énergie en Inde

L'Inde est le plus grand utilisateur d'eaux souterraines dans le monde. Le pays en extrait annuellement quelque 251 km³, dont 89 % sont utilisés pour l'irrigation (Margat et Van der Gun, 2013 -- figure 3.1), par le biais d'environ 20 millions de puits et de puits tubés. On estime que 60 % de la superficie irriguée en Inde est desservie par des eaux souterraines (Shah, 2009). L'irrigation par eau souterraine a contribué au succès de la révolution verte dans le pays à partir des années 1960. Cependant, il est devenu évident que les gains en termes de productivité de l'agriculture irriguée ont progressivement conduit à une baisse significative du niveau des nappes souterraines dans certaines parties du pays, en particulier dans le nord-ouest et le sud péninsulaire de l'Inde (Shah, 2009). Actuellement, la crise de l'eau que traverse l'Inde peut être attribuée en grande partie à l'expansion de l'irrigation par eau souterraine, résultat de la politique indienne en matière d'alimentation et d'électricité qui remonte à la fin des années 1970. La politique alimentaire garantissant des produits bon marché aux consommateurs impose de maintenir les prix des intrants à un niveau bas, y compris les tarifs de l'électricité utilisée pour le pompage des eaux souterraines. La réduction des tarifs d'électricité ou la gratuité de l'électricité pour l'agriculture, comme c'est le cas dans de nombreux États indiens, associée à la garantie d'achat des récoltes par l'État ou le gouvernement, encourage les agriculteurs à cultiver des plantes gourmandes en eau comme la canne à sucre, y compris dans les régions semi-arides où la recharge naturelle des aquifères est faible. Cette situation est à la base d'un épuisement sans précédent des nappes souterraines dans une grande partie de l'Inde (Mukherji, 2020).

En Inde, les extractions excessives d'eaux souterraines peuvent être attribuées à un manque de cohérence entre les politiques hydrauliques, énergétiques et alimentaires. Par conséquent, les solutions aux problèmes d'eau souterraine ne peuvent que s'inscrire dans un contexte plus large où l'eau, l'énergie et l'alimentation sont considérées dans leurs interactions (Shah et al., 2012). Une gestion indirecte des eaux souterraines par le biais des politiques en matière d'électricité a été tentée dans de nombreux États indiens, notamment au travers de l'installation de compteurs sur les alimentations électriques des agriculteurs et de la facturation, à des tarifs proches des tarifs commerciaux, des dépenses pour l'irrigation (par exemple dans l'État du Bengale occidental — Mukherji et al., 2009) ou du rationnement de l'électricité pour les agriculteurs sur un nombre limité d'heures par jour, réalisé par la séparation des alimentations électriques en alimentations agricole et domestique (par exemple dans les États du Gujarat, du Karnataka et du Punjab — Shah et al., 2008 ; Mukherji, 2017). Ces deux mesures, à savoir la tarification et le rationnement de l'électricité, visent à réduire la demande en eaux souterraines en incitant à une prise de conscience quant au prix et à la rareté de la ressource (Sidhu et al., 2020). Plus récemment, les inquiétudes concernant les fortes émissions de carbone dues au pompage des eaux souterraines en Inde et le fardeau croissant des subventions pour les compagnies d'électricité ont conduit à la mise en place de SPIS. L'usage des SPIS connectés est encouragé afin d'inciter les agriculteurs à pomper moins d'eau souterraine et à revendre l'électricité au réseau plutôt que de l'utiliser pour en pomper davantage (Shah et al., 2018). Pour le moment, il n'existe néanmoins aucunes données permettant de déterminer si les SPIS connectés réduisent réellement le pompage des eaux souterraines. Les émissions de gaz à effet de serre dues au pompage des eaux souterraines, par rapport aux émissions nationales totales dues à la consommation d'énergie, vont de 0,5 % en Chine (Wang et al., 2012) et 3,6 % au Mexique (Scott, 2013) à 8-11 % en Inde (Rajan et al., 2020). La situation est encore aggravée par le fait que le méthane dissous dans les eaux souterraines anoxiques profondes, libéré lorsque les eaux souterraines sont pompées vers la surface, peut également accentuer cette part (Kulongoski et McMahon, 2019).

Chapitre 4

Les eaux souterraines pour les établissements humains

IWA
Stephen Foster

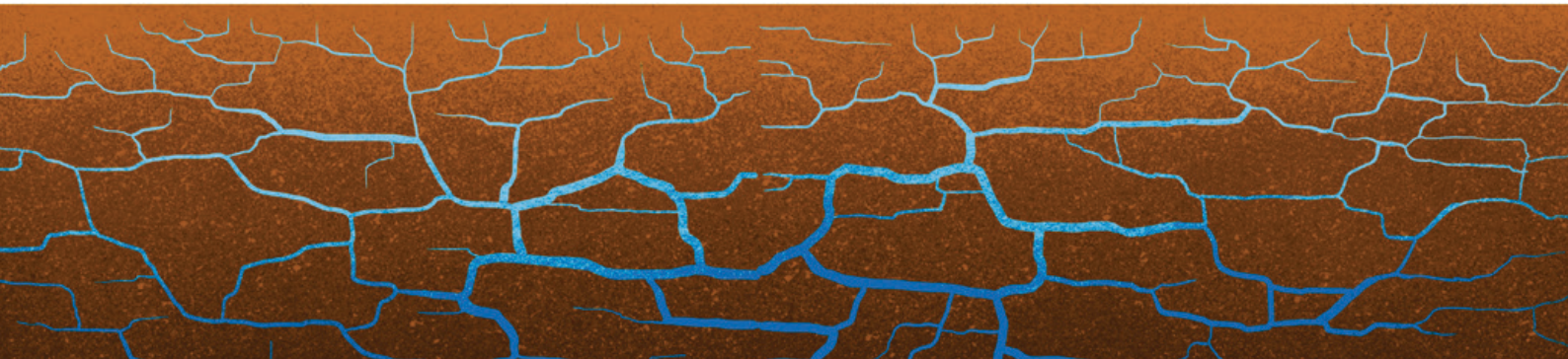
ONU-Habitat
Pireh Otieno

RWSN*
Kerstin Danert

AIH
Alan MacDonald**

* Ask for Water GmbH pour le compte du Réseau d'approvisionnement en eau en milieu rural (RWSN)

** Affilié au Service géologique britannique



4.1 Introduction

4.1.1 Champ d'application du sujet

Le présent chapitre dresse un tableau de l'approvisionnement en eau souterraine (notamment l'eau potable) à des fins domestiques tant en milieu urbain que rural. À ce titre, il est étroitement lié aux objectifs de développement durable 3 et 6 du Programme de développement durable à l'horizon 2030 de l'ONU. L'approvisionnement en eau peut être fourni par les services publics, les opérateurs commerciaux, les particuliers et les organisations communautaires. Si l'approvisionnement en eau des villes est généralement fourni par les services d'eau, l'utilisation de puits privés pour assurer un approvisionnement autonome en milieu urbain s'est accrue dans de nombreuses villes des pays en développement. Ce chapitre se penche aussi sur le rôle des eaux souterraines dans l'approvisionnement en eau en milieu rural et rappelle que les puits[9] constituent souvent la seule source d'eau potable fiable à laquelle les villages ont accès toute l'année. Ce chapitre examine aussi les dangers associés à l'utilisation des eaux souterraines ainsi que le problème de la pollution des eaux souterraines causée par le manque d'assainissement en zones urbaines et rurales.

4.1.2 Aperçu de l'évolution historique

L'humanité a toujours satisfait ses besoins en eau potable grâce aux sources d'eau souterraine (Margat et Van der Gun, 2013). Les sources, qui sont les manifestations de surface des nappes souterraines, ont joué un rôle majeur dans le développement de nos sociétés, si bien que les premiers puits ont été creusés dans certaines régions d'Asie, du Moyen-Orient et d'Éthiopie à des profondeurs allant jusqu'à 50 mètres.

Au cours du XXe siècle, la construction de puits pour l'approvisionnement en eau des villes a connu un essor considérable. Les progrès majeurs réalisés en matière de forage, de technologies de pompage, d'accès à l'énergie et de savoirs géologiques ont permis de forer plus rapidement des puits plus profonds et d'en extraire de plus grandes quantités d'eau. Parallèlement, des puits peu profonds, construits grâce à une technologie au coût abordable et équipés de pompes manuelles, ont été mis en place afin d'assurer l'approvisionnement des communautés en zones rurales. Les eaux souterraines sont ainsi devenues une ressource naturelle clé, indispensable au bien-être humain et au développement économique, même si elle restait encore largement méconnue, sous-évaluée, mal gérée et insuffisamment protégée (AIH, 2015).

4.1.3 Données relatives à l'extraction des eaux souterraines

Selon les estimations, le volume d'eaux souterraines prélevé dans le monde dépasse 900 km³/an depuis 2010, les puits et les sources fournissant environ 36 % de l'approvisionnement en eau potable (Döll et al., 2012 ; Margat et Van der Gun, 2013). La dépendance de multiples villes à l'égard des eaux souterraines semble s'accroître de sorte que l'on estime à près de 50 %, la population urbaine mondiale aujourd'hui alimentée par des sources d'eaux souterraines (Foster et al. 2020b). Dans le cas de l'Union européenne et des États-Unis, les services publics d'eau utilisent les eaux souterraines pour alimenter 310 et 105 millions de personnes respectivement. Cependant, il convient de noter qu'à l'échelle nationale, les statistiques complètes sur le pompage des eaux souterraines pour les établissements humains sont lacunaires (tableau 4.1).

Le volume des prélèvements ne suffit toutefois pas à déterminer la valeur sociale des eaux souterraines. En effet, l'utilisation des eaux souterraines apporte de nombreux avantages économiques et sanitaires : la possibilité de s'adapter à la demande hydraulique, une source d'eau fiable en cas de sécheresse, un accès à une eau de bonne qualité ne nécessitant que peu de traitement (AIH, 2015), et un gain de temps considérable pour les femmes et les filles dans les endroits où elles assurent la collecte de l'eau. Néanmoins, la croissance très élevée de la population urbaine entraîne une demande sans précédent en matière d'approvisionnement en eau et d'assainissement, ce qui constitue un véritable défi en matière de planification urbaine.

---

[9] Le terme « puits » est un terme générique qui fait ici référence, à la fois, aux puits creusés, aux conduits, aux forages, aux puits tubés et aux galeries utilisées pour extraire les eaux souterraines.

Tableau 4.1 Données nationales relatives aux prélèvements d'eaux souterraines en milieu urbain

Pays	Population (en millions de personnes)	Population urbaine (en millions de personnes)	Volumes d'eau distribués par les services d'eau (en Mm³/an)	Volumes (en Mm³/an) et proportion d'eaux souterraines distribuées par les services d'eau	Villes étudiées ayant une utilisation importante des eaux souterraines
Brésil	209,3	178,2	16 740 **	3 164 (19 %)	Natal, Ribeirão Preto, São Luís do Maranhão
Chili	16,4	14,7	1 267	498 (39 %)	Santiago, Coquimbo, Concepción
Costa Rica	4,9	4,0	652	522 (80 %)	San José, Puntarenas, Liberia
Mexique	129,2	102,1	14 230 *	7 000 (49 %)	Mexico, Mérida, San Luis Potosí, León
Paraguay	6,4	3,9	362 *	272 (75 %)	Asunción, Villarica
États-Unis d'Amérique	324,5	270,7	58 390 *	21 001 (36 %)	Miami, Tampa, Phoenix, Oklahoma
Côte d'Ivoire	24,3	12,2	321 **	?	Abidjan, Bouaké
Éthiopie	105,0	21,3	810 *	?	Addis Abeba, Dire Dawa
Kenya	49,7	13,2	495 **	?	Mombasa, Nakuru
Sénégal	15,9	7,4	98 *	?	Dakar, St Louis
Tanzanie	42,9	9,9	328 **	?	Dodoma, Arusha, Tanga
Zambie	17,1	7,3	290 **	60 (21 %)	Lusaka, Kabwe
Inde	1 339,2	455,3	56 000 **	13 328 (24 %)	Lucknow, Chennai, Chandigarh, Indore
Pakistan	197,0	70,9	9 650 **	2 934 (30 %)	Islamabad, Lahore, Rawalpindi, Multan
Chine	1 409,5	817,5	79 400 *	7861 (10 %)	Tianjin, Beijing, Handan, Shenyang
Indonésie	964,0	145,2	23 800 **	21 420 (90 %)	Jakarta, Semarang, Yogyakarta
Viet Nam	95,5	33,4	1 206 *	555 (46 %)	Hô Chi Minh-Ville, Da Nang, Hanoï
Bangladesh	164,7	59,3	3 600 **	2 603 (72 %)	Dhaka, Khulna, Chattogram
Danemark	5,8	5,1	230	230 (100 %)	Copenhague, Odense, Aarhus, Aalborg
France	67,0	53,9	1 774	1 064 (60 %)	Paris, Caen, Limoges, Le Mans, Poitiers
Allemagne	83,1	64,1	1 606	1 188 (74 %)	Hambourg, Berlin, Munich, Hanovre
Hongrie	9,7	7,0	257	244 (95 %)	Budapest, Miskolc
Italie	60,3	42,6	1 391	1 210 (87 %)	Rome, Milan, Turin, Pérouse
Pays-Bas	17,4	15,8	489	298 (61 %)	Utrecht, Eindhoven, La Haye
Pologne	37,2	22,8	576	357 (62 %)	Varsovie, Wrocław, Poznań, Cracovie
Royaume-Uni	66,8	55,5	3 558	1 245 (35 %)	Portsmouth, Hull, Cambridge, Brighton

Note : ** / *, l'utilisation de puits privés pour assurer un approvisionnement autonome en eau constitue un problème majeur ou important.

Source : basé en grande partie sur les données de l'OMS/UNICEF (2019) pour l'année 2017, qui sous-estiment l'extraction d'eau souterraine et ne fournissent aucune donnée sur l'utilisation de puits privés *in-situ*.

4.2 L'approvisionnement en eau en zones urbaines

4.2.1 Les systèmes publics

Les eaux souterraines présentent de nombreux avantages en tant que ressource de base pour les services publics de distribution d'eau (tableau 4.2) ; en effet, grâce à leur remarquable qualité naturelle, elles ne nécessitent qu'une désinfection préventive avant leur mise en circulation dans les systèmes de distribution (encadré 4.1).

En règle générale, les centres urbains installés sur, ou à proximité, d'aquifères à haut rendement bénéficient de meilleurs services publics de distribution d'eau et à des tarifs plus bas, en raison de la possibilité d'accroître l'approvisionnement d'eau au gré de l'augmentation de la demande, et ce pour un coût modeste (AIH, 2015). Ce pourquoi la plupart les établissements humains installés dans des lieux aux conditions hydrogéologiques favorables dépendent d'abord largement des eaux souterraines pour leur approvisionnement en eau (figure 4.1) et bénéficient, de plus, d'une sécurité dans l'approvisionnement en cas de sécheresse prolongée ou de pollution des eaux de surface (Foster et al., 2018).

Tableau 4.2 Résumé des avantages que présentent les sources d'eaux souterraines pour les services publics de distribution d'eau

Avantages des eaux souterraines	Bénéfices pour l'approvisionnement en eau
• Large distribution avec un accès direct dans de nombreux districts périphériques • La qualité de base est généralement excellente et ne requiert qu'un traitement minimal (sauf en cas de pollution anthropique ou de contamination naturelle — Foster et al., 2020b)	• Leur exploitation nécessite généralement de faibles dépenses d'investissement et peu de dépenses récurrentes (sauf dans un petit nombre de contextes hydrogéologiques), qui peuvent être échelonnés en cas d'une demande croissante
• Immenses réservoirs naturels qui peuvent être utilisés pour le stockage de l'eau à long terme • À l'abri de la variabilité des précipitations, contrairement aux sources d'eau de surface	• Niveau élevé de sécurité de l'approvisionnement en eau lors des épisodes de sécheresse et de pollution fluviale

Source : Foster et al. (2020a).

Encadré 4.1 Exemple de gestion réussie de l'extraction d'eaux souterraines en milieu urbain à Hambourg (Allemagne)

Forte d'une population de près de 2,2 millions d'habitants, Hambourg est desservie en eau par une compagnie municipale. En 1964, après une longue transition, la ville a cessé de s'approvisionner par les eaux fluviales filtrées pour utiliser les nappes souterraines. Aujourd'hui, environ 470 puits pompant quelque 120 millions de m³/an dans un aquifère alluvial peu profond et une formation plus profonde sont exploités. Neuf des zones de captage disposent d'un statut juridique qui en fait des zones de protection des eaux souterraines, mais trois d'entre elles sont situées hors de la juridiction de la ville et leur protection doit être négociée avec les autorités voisines. Dans certains cas, cette situation a pu engendrer des conflits du fait de la vulnérabilité de l'aquifère peu profond à la pollution agricole et industrielle, et des risques de salinisation de l'aquifère plus profond par les dômes de sel adjacents.

La compagnie d'eau entretient donc son propre réseau d'environ 1 400 forages de contrôle, qui fournissent une vue complète et dynamique de la qualité des eaux souterraines. Les données sont stockées dans un système d'information numérique, qui contient également des données sur le niveau des nappes. En coopération avec les services géologiques gouvernementaux, une modélisation numérique des nappes souterraines a été élaborée à partir d'une superficie de 4 500 km² et plus de 3 000 puits de production, et calibrée avec plus de 7 000 forages de contrôle. Elle est utilisée pour la prise de décision dans la gestion des champs de captage, les demandes de droits d'utilisation de l'eau, les interactions avec les extractions industrielles d'eaux souterraines, l'amélioration des zones de protection des eaux souterraines et le contrôle des risques graves de pollution.

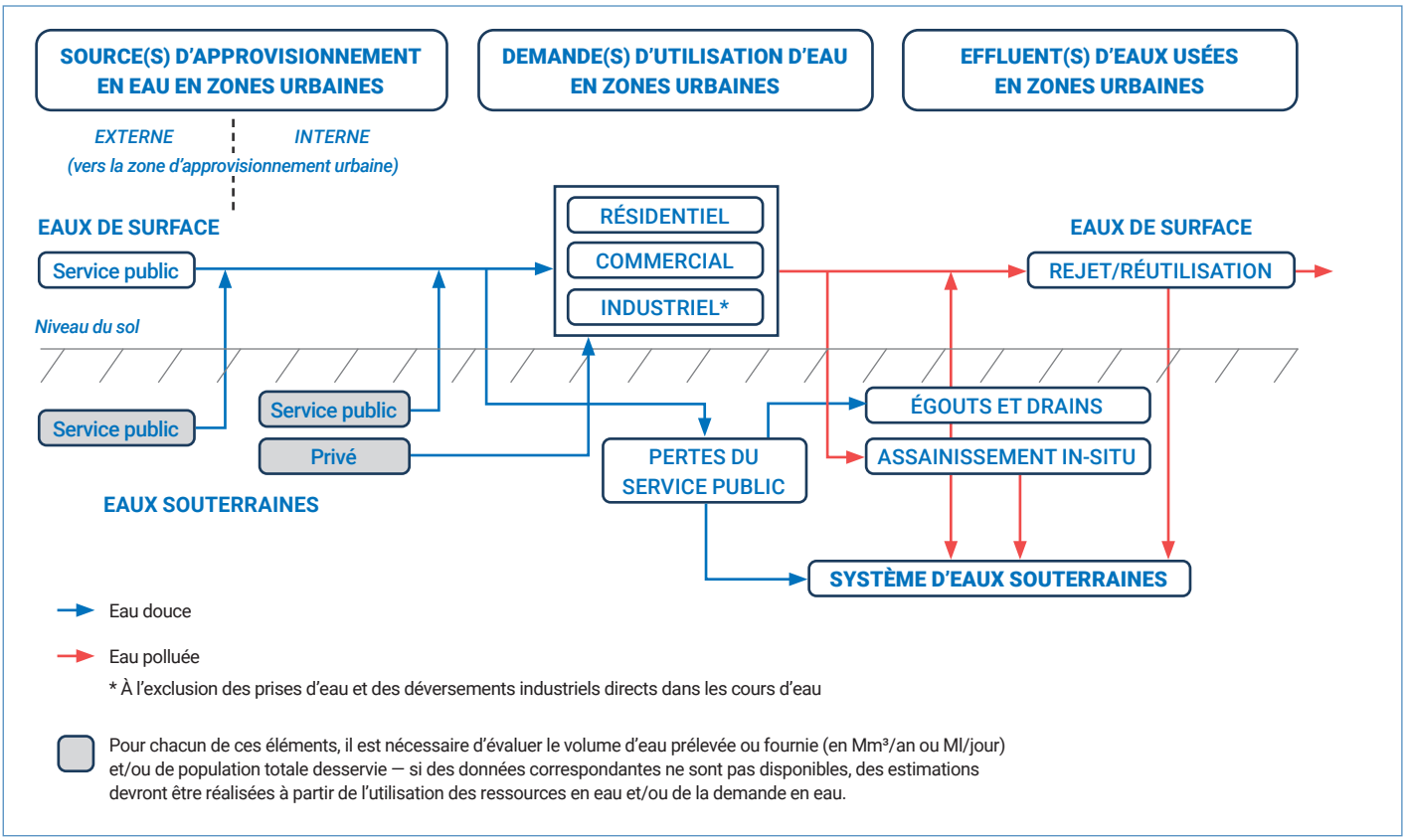
Source : Foster et al. (2020a).

Les eaux souterraines présentent de nombreux avantages en tant que ressource de base pour les services publics de distribution d'eau

Les eaux souterraines contribuent indirectement à la réduction de la pauvreté urbaine dans la mesure où elles permettent aux services de distribution d'eau d'exploiter des sources à un coût beaucoup plus bas et de réduire les frais de raccordement. Toutefois, de nombreuses personnes pauvres en milieu urbain habitent dans des établissements périurbains, non aménagés et dépourvus de statut juridique, où les infrastructures et les services publics de distribution d'eau sont absents (AIH, 2015).

À l'avenir, la vaste présence de ressources en eaux souterraines devrait permettre le développement rapide de puits d'approvisionnement qui constitueront la base de nouveaux systèmes décentralisés de distribution d'eau pour les zones périurbaines en expansion qui comptent entre 20 000 et 50 000 habitants (AIH, 2015). Ces systèmes permettraient de réduire les coûts des infrastructures, la consommation d'énergie et les pertes en eau, les puits profonds étant généralement parfaitement adaptés pour les alimenter en eau. Afin de limiter la présence, dans le sous-sol, de contaminants liée à l'assainissement *in-situ*, la construction des puits doit être associée à la séparation et à la récupération de l'urine qui peut servir d'engrais ainsi qu'à la récupération des matières fécales qui peuvent produire de l'énergie (soit la valorisation des eaux usées en tant que ressource). En outre, des efforts supplémentaires seront nécessaires sur le terrain pour contrôler les autres sources de pollution des eaux souterraines en milieu urbain (telles que les stations-service, les ateliers de mécanique, les garages et les blanchisseries).

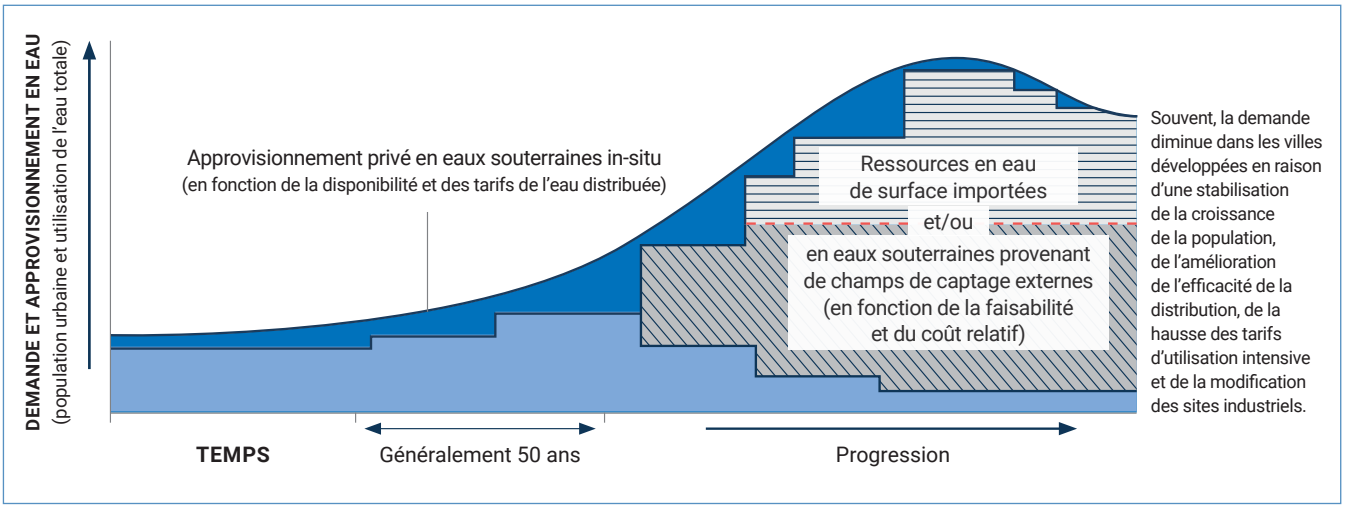
Figure 4.1 Aperçu schématique des sources d'approvisionnement en eau en zones urbaines, de leur utilisation et de leurs interactions



Source : adapté de Foster et Hirata (2012, fig. 1, p. 22).

Au sein du périmètre des grandes villes, les eaux souterraines ne sont souvent pas disponibles en quantité suffisante pour répondre durablement à la demande hydraulique (figure 4.2). Là où des aquifères à haut rendement se trouvent à proximité, l'installation de « champs de captage extérieurs » s'avère une solution plus intéressante que l'importation d'eaux de surface sur de longues distances. La zone de captage de ces champs doit, par contre, être protégée contre la pollution et la surexploitation grâce à un contrôle de l'emploi des sols et à une réglementation des puits.

Figure 4.2 Évolution typique de l'approvisionnement en eau des zones urbaines



Source : adapté de Foster et Hirata (2012, fig. 2, p. 22).

La présence de grands aquifères à proximité des zones urbaines contribue à renforcer la résilience de leur approvisionnement en eau. En effet, grâce aux très larges volumes d'eau souterraine qu'ils stockent, ces aquifères constituent un « tampon naturel » vis-à-vis de la variabilité des débits des cours d'eau et des niveaux des réservoirs de surface (Foster et al., 2020a ; 2020c). L'eau stockée dans les aquifères bénéficie également d'une protection naturelle contre les pertes par évapotranspiration et présente moins de risques de pollution que les eaux de surface.

La gestion conjointe de l'utilisation des eaux souterraines et des eaux de surface offre la possibilité de renforcer la sécurité de l'approvisionnement en eau ; elle a été mise en place avec succès dans de nombreuses villes dont Lima

La gestion conjointe de l'utilisation des eaux souterraines et des eaux de surface offre la possibilité de renforcer la sécurité de l'approvisionnement en eau ; elle a été mise en place avec succès dans de nombreuses villes dont Lima (encadré 4.2). Un projet récemment lancé à Delhi prévoit de collecter le débit excédentaire de la mousson en vue de recharger l'aquifère qui alimente la ville en eau potable, ce qui constitue une autre forme d'utilisation combinée.

Au Brésil, les villes alimentées uniquement par des eaux de surface furent presque deux fois plus exposées aux effets de la grande sécheresse de 2013-2017 que celles qui utilisaient les eaux souterraines de façon significative (Foster et al., 2020a). En Inde, les eaux souterraines couvrent 48 % de l'approvisionnement en eau de soixante-dix villes et villages (Alam et Foster, 2019), mais à Madras (encadré 4.3), par exemple, la sécurité de l'approvisionnement en eau a été menacée par une exploitation excessive des aquifères. La partialité spontanée de certains membres du personnel des services d'eau envers la construction et l'exploitation de grands réservoirs d'eaux de surface peut entraver l'utilisation stratégique des ressources locales en eaux souterraines, un facteur aggravant lors de la récente crise dans la distribution d'eau au Cap, en Afrique du Sud (Olivier et Xu, 2019).

4.2.2 Approvisionnement autonome privé et approvisionnement communautaire

Le terme « approvisionnement autonome » fait référence aux investissements pour l'approvisionnement en eau directement réalisés par les utilisateurs (Foster et al., 2010b ; Oluwasanya et al., 2011 ; Foster and Hirata, 2012 ; Coulibaly et al., 2014). Dans les économies en développement, la plupart des personnes disposant d'un approvisionnement autonome ont recours aux eaux souterraines et partagent celui-ci avec leurs voisins (Sutton et Butterworth, 2021). L'approvisionnement autonome à partir des eaux souterraines constitue une solution rapide là où cette option est techniquement réalisable par ceux qui en ont les moyens.

Encadré 4.2 Un projet d'utilisation combinée des eaux vise à préserver un aquifère d'importance vitale à Lima

Lima s'étend sur les cônes de déjection hyper-arides de deux fleuves, le Río Rímac et le Río Chillón. Dans cette région, la recharge des nappes souterraines se produit par infiltration (récemment plus forte) des eaux provenant des lits fluviaux, des pertes provenant des canaux d'irrigation et par l'excès d'irrigation des terres agricoles et d'agrément (en baisse) ainsi que par fuites des conduites d'eau et des égouts. Entre les années 1960 et 1980, la ville a connu une forte croissance démographique qui a porté le nombre de ses habitants à plus de 8 millions et la demande hydraulique a augmenté pour atteindre plus de 2 000 Ml/jour en 1997. Les installations hydrauliques construites sur le Río Rímac ont été agrandies en vue d'atteindre une capacité de 860 Ml/jour, bien que les concentrations extrêmes de solides en suspension et les périodes de sécheresse ne permettent pas toujours son fonctionnement au niveau de production maximal. Sur le volume total de l'approvisionnement en eau en 1997, 1 050 Ml/jour provenaient des eaux souterraines (dont 720 Ml/jour fournis par 380 puits de distribution) avec pour conséquence une baisse du niveau de la nappe souterraine comprise entre 1 et 5 m/an, qui a entraîné des effets secondaires coûteux.

D'importantes études ont été réalisées en vue d'optimiser l'utilisation combinée des eaux souterraines et des eaux de surface grâce à la micromesure concertée de l'utilisation domestique de l'eau afin de réduire le gaspillage, à la limitation des extractions d'eau souterraine dans certaines zones critiques, au transfert de jusqu'à 260 Ml/jour d'eaux de surface des Andes vers le Río Rimac, à l'amélioration de la flexibilité de la distribution de l'eau afin de permettre à la plupart des utilisateurs d'être approvisionnés par l'une ou l'autre source et par l'augmentation de la recharge du lit du Río Rímac sur 6 km. Ces interventions ont été facilitées par des accords institutionnels habilitant les services d'eau à agir au nom du gouvernement. Le succès du programme d'utilisation combinée s'est traduit par une augmentation de 5 à 30 mètres du niveau de la nappe phréatique entre 1997 et 2003 (après un déclin de 10 à 40 mètres au cours de la décennie précédente) ainsi que par une réduction des prélèvements des services d'eau, qui sont passés de 265 Mm^3/an en 1997 à 135 Mm^3/an en 2009 et ce, tout en conservant la capacité d'augmenter la production à court terme.

Source : adapté de Foster et al. (2010a, encadré B, p. 10).

L'investissement dans des puits privés est un moyen d'attirer des financements significatifs, comme en attestent un nombre croissant de données ainsi que la reconnaissance grandissante du phénomène (Foster et al., 2010b ; Grönwall, 2011 ; Butterworth et al., 2013 ; Sutton, 2017 ; Grönwall et Danert, 2020). Néanmoins, l'utilisation privée des eaux souterraines tend à ne pas être prise en compte par les statistiques nationales officielles relatives à l'approvisionnement en eau (Danert et Healy, 2021), voire à ne pas être reconnue du tout par les gouvernements (AIH, 2015).

Ces dernières années, l'utilisation de puits privés pour assurer un approvisionnement autonome en milieu urbain a proliféré en Asie du Sud, en Amérique latine et en Afrique subsaharienne (Foster et al., 2010b ; Grönwall et al., 2010 ; Alam et Foster, 2019). Généralement adoptée comme « stratégie d'adaptation » du fait d'un approvisionnement en eau irrégulier ou insuffisant, cette pratique se perpétue ensuite comme stratégie d'évitement de tarifs plus élevés. Il s'agit d'un moyen efficace de favoriser l'investissement des particuliers dans l'accès à l'eau.

Dans la plupart des contextes hydrogéologiques, les coûts de construction d'un puits privé varient entre 2 000 et 20 000 dollars EU ; ces coûts sont considérablement plus élevés (entre 30 000 et 45 000 dollars EU) lorsque des forages profonds (de 200 à 300 m) sont nécessaires.

Encadré 4.3 Les eaux souterraines aident à lutter contre de graves crises d'approvisionnement en eau à Madras (Inde)

Au cours de la période 2017-2019, Madras, qui compte 8,6 millions d'habitants, a dû faire face à une grave crise d'approvisionnement en eau lorsque ses principaux réservoirs se sont pratiquement asséchés en raison d'une sécheresse persistante. En juin 2019, leurs réserves combinées ne représentaient plus que 0,1 % de leur capacité de stockage totale et les services d'eau ne pouvaient fournir à la ville que 520 Ml/jour, principalement à partir des eaux souterraines locales, alors que la demande totale quotidienne atteignait 830 Ml. Bien que la ville dispose de plus de 420 000 puits privés, le niveau de la nappe souterraine a baissé de manière significative sur de vastes zones, entraînant une intrusion d'eau salée causée par la surexploitation de l'aquifère à long terme et par une faible recharge lors des dernières moussons peu importantes.

Ces problèmes ont obligé Madras à déployer quelque 5 000 camions-citernes d'une capacité de 9 000 litres chacun qui, à raison de 5 à 6 voyages par jour, alimentent la ville grâce aux eaux souterraines provenant des zones rurales environnantes, à raison de 200 à 300 Ml/jour. Toutefois, la persistance d'une mauvaise gestion des ressources en eau au niveau local a provoqué des tensions entre les populations urbaines et rurales.

Source : Alam et Foster (2019).

Ces dernières années, l'utilisation de puits privés pour assurer un approvisionnement autonome en milieu urbain a proliféré en Asie du Sud, en Amérique latine et en Afrique subsaharienne

Dans le dernier cas, posséder un puits privé restera le privilège des plus aisés, ne représentant en rien une option favorable aux personnes les plus pauvres. Par ailleurs, si ces aménagements permettent de soulager les services d'eau, ils peuvent également avoir de graves répercussions sur les flux de trésorerie et les cycles d'investissement de ces derniers (Foster et al., 2018). De toute évidence, l'approvisionnement autonome en zones urbaines doit être réglementé ; sans un contrôle régulier de la qualité des eaux, il continuera de présenter des risques pour les utilisateurs, même si ceux-ci sont apparemment satisfaits de leur approvisionnement.

Les travaux de recherche sur l'approvisionnement autonome des populations urbaines en eaux souterraines ont montré que :

- En Inde, quelque 340 millions de citadins dépendent principalement d'un approvisionnement autonome à partir des eaux souterraines (Sutton et Butterworth, 2021) et de nombreuses villes de taille moyenne ont une forte dépendance vis-à-vis de l'approvisionnement autonome en eaux souterraines pour les usages domestiques, qui peut représenter de 40 % à 60 % de toute la distribution d'eau (Alam et Foster, 2019) ;
- Au Brésil, l'approvisionnement autonome à partir des eaux souterraines pour des usages domestiques correspond à près de 35 % de l'approvisionnement total en eau de São Paulo en période de sécheresse (bien qu'il ne soit pas admis par les autorités et alors même que la ville ne repose sur aucun aquifère majeur) ; à l'échelle nationale, il existe au moins 2,5 millions de puits privés qui représentent 6 à 7 fois l'investissement annuel dans l'approvisionnement en eau des agences gouvernementales (Foster et al., 2020a).

Le cas du Nigeria est particulièrement révélateur compte tenu de la taille importante et de la croissance rapide de sa population urbaine ainsi que de l'ampleur de l'approvisionnement autonome dans le pays. En 2009, on estimait que sur l'ensemble de la population urbaine (75 à 80 millions de personnes), entre 38 et 43 millions de citadins dépendaient de puits privés en dépit d'un élargissement de la distribution publique d'eau. Dans la seule ville de Lagos, environ 20 % des 18 à 20 millions d'habitants sont desservis par un service public d'approvisionnement tandis qu'environ 50 % possèdent des forages privés et que les 30 % restants s'approvisionnent à partir de ces sources (Healy et al., 2017).

S'agissant des bidonvilles informels et des communautés périurbaines les plus pauvres, l'accès aux eaux souterraines n'est possible que dans les cas où :

- Les organisations communautaires utilisent leur capital social et leurs réseaux politiques pour obtenir un financement, pour des puits hors réseau de distribution, de la part des programmes gouvernementaux ;
- Les organisations non gouvernementales installent des puits hors réseau de distribution aux points de collecte d'eau ;
- Des puits peuvent être creusés à faible coût afin d'exploiter des nappes phréatiques particulièrement peu profondes mais qui présentent le désavantage d'être beaucoup plus exposées aux pollutions fécales et chimiques (Grönwall, 2016 ; Lapworth et al., 2017).

L'utilisation privée des eaux souterraines tend à ne pas être prise en compte par les statistiques nationales officielles relatives à l'approvisionnement en eau

En outre, il faut ici citer en particulier les établissements, aussi bien temporaires que permanents, des personnes déplacées et des personnes marginalisées. Souvent densément peuplées, ces zones d'installation ne rentrent ni dans la catégorie des zones urbaines ni dans celle des zones rurales. Dans ces cas, il est vital de construire des puits de bonne conception. À titre d'exemple, il convient d'évoquer les villes turques qui accueillent un grand nombre de réfugiés syriens ainsi que les camps de réfugiés rohingyas au Bangladesh. Ces zones d'habitation s'approvisionnent en eau à partir de puits profonds construits par des organismes d'aide ou des organismes humanitaires (encadré 4.4).

4.2.3 Facteurs et tendances de l'utilisation des eaux souterraines en zones urbaines

Aujourd'hui, les facteurs qui influencent l'utilisation des eaux souterraines en milieu urbain sont l'accélération des taux d'urbanisation, l'augmentation de la quantité d'eau par habitant, la hausse des températures ambiantes et l'insécurité croissante des prises d'eau fluviale en raison de la pollution de l'eau et du changement climatique, ainsi que le coût relativement faible de la construction des puits et de leur exploitation (AIH, 2015). À ceci s'ajoute une autre pratique qu'il convient d'évoquer : l'approvisionnement en eau des zones urbaines par des camions-citernes privés qui acheminent l'eau depuis des puits principalement situés dans les zones rurales voisines.

En Afrique tropicale, on constate qu'au niveau régional, le taux d'amélioration de l'approvisionnement en eau dans les villes a eu tendance à décroître entre 1990 et 2015 (Banerjee et al., 2008). La population urbaine qui reste « non desservie » par un approvisionnement en eau amélioré peut être divisée (Oluwasanya et al., 2011) en trois groupes :

- Ceux (entre 70 % et 80 %) qui vivent à proximité immédiate d'une infrastructure existante, mais qui ne veulent pas, ou qui ne peuvent pas, y être raccordés, en raison des coûts de raccordement excessifs et/ou de l'instabilité d'occupation de leur logement ;
- Ceux (entre 20 % et 30 %) qui vivent loin d'une infrastructure existante où le coût d'investissement pour étendre le réseau de distribution est trop élevé pour les services d'eau, compte tenu des faibles perspectives de recouvrement des coûts d'investissement, à moins qu'une subvention de l'approvisionnement ne soit garantie ;
- Les autres, pour qui la disponibilité et la fiabilité de l'approvisionnement en eau par les compagnies d'eau sont si insuffisantes qu'ils doivent régulièrement recourir à des solutions alternatives (telles que l'eau en bouteille — coûteuse — ou les camions-citernes — peu fiables).

Encadré 4.4 Au Bangladesh, un puits profond permet de fournir de l'eau potable aux réfugiés rohingyas

Ces dernières années, près d'un million de réfugiés rohingyas ont migré vers un camp situé près de Cox's Bazar, au nord de la frontière entre le Myanmar et le Bangladesh. Malgré les fortes précipitations locales, fournir de l'eau potable à ces personnes déplacées n'est pas sans difficulté, car les aquifères peu profonds de la région sont pollués par les excréments humains. La solution a consisté à forer un puits d'une profondeur de 100 à 300 mètres afin d'exploiter l'aquifère de Tipam Sandstone. L'énergie nécessaire au pompage de l'eau est produite par 187 panneaux solaires. Après une chloration préventive, l'eau est stockée dans six réservoirs, d'une capacité de 95 000 litres chacun, pour être ensuite distribuée par gravité aux habitants du camp.

Source : OIM (2019)..

4.3 L'approvisionnement en eau en zones rurales

4.3.1 Amélioration des sources d'eau dans les villages

La nature des eaux souterraines les rend particulièrement adaptées à une distribution dispersée pour les populations des zones rurales. Il s'agit souvent du moyen le plus rentable de fournir un approvisionnement en eau fiable aux villages. Cela est d'autant plus vrai en Afrique subsaharienne et en Asie du Sud, où la population des zones rurales est nombreuse mais dispersée. Les eaux souterraines continueront de constituer la principale source d'eau pour les foyers en milieu rural dans les pays en développement (Foster et al., 2008). L'adoption de puits à pompe manuelle communautaires dans les années 1980, pendant la Décennie internationale de l'eau potable et de l'assainissement, a permis aux populations rurales des pays à faible revenu de bénéficier d'une augmentation constante de l'accès à l'eau potable (Arlosoroff et al., 1987).

Pour répondre à leurs besoins, les villages ruraux nécessitent de faibles volumes d'eau, qui peuvent être fournis par des forages de petit diamètre, des puits creusés manuellement ou directement par des sources, l'eau étant prélevée par des pompes manuelles ou de petits équipements de pompage motorisés de faible capacité (entre 0,2 et 1,0 l/sec). En général, ces dispositifs d'approvisionnement en eau ne sont pas raccordés aux habitations, même si les personnes ont tendance à vouloir forer et exploiter des puits privés sur leurs propres terrains. Si les pompes manuelles permettent, avec l'expertise appropriée, de prélever de l'eau dans la plupart des types de roche, la mise en place d'un réseau d'approvisionnement en eau pour les grands villages (> 1,0 l/sec) peut être plus difficile.

L'utilisation des eaux souterraines comprend à la fois des sources d'eau dites « améliorées », dont la qualité sanitaire est satisfaisante, et un grand nombre de sources d'eau non améliorées (tableau 4.3), dont la qualité microbiologique est fortement menacée par l'infiltration directe d'eaux de surface polluées. La part des sources d'eau améliorées est en constante augmentation, notamment grâce à l'application des conseils fournis par le Réseau pour l'approvisionnement en eau en milieu rural[10].

Selon une étude récente menée en Éthiopie, au Malawi et en Ouganda, plus de 90 % des réserves d'eaux souterraines en milieu rural présentaient une qualité physico-chimique qui les rendait propres à la consommation bien qu'il existe des zones géologiques particulières où des niveaux élevés d'arsenic et de fluorure constituent un danger. Les eaux souterraines présentent un avantage majeur : leur résilience aux variations climatiques. En effet, elles ne dépendent pas seulement des précipitations des quelques dernières années ; elles sont alimentées par les précipitations sur plusieurs années, voire plusieurs décennies. Des études sur la performance des approvisionnements en eaux souterraines en milieu rural menée en Éthiopie pendant la récente sécheresse de 2015-2016 ont ainsi révélé que les forages équipés de pompes manuelles ont obtenu de meilleurs résultats que tous les autres types d'approvisionnements en eau (MacDonald et al., 2019).

[10] www.rural-water-supply.net/fr/

Tableau 4.3
Répartition des services d'approvisionnement en eau potable qui utilisent les eaux souterraines

Catégorie	Définition	Exemples de sources d'eau
Source privée améliorée	• Eau potable disponible immédiatement provenant d'une source d'eau améliorée • Exempte de matières fécales et de contamination chimique	• Forage privé de bonne qualité sanitaire situé sur la propriété • Distribution d'eau par réseau/ canalisations à partir d'un forage protégé
Source communautaire élémentaire	• Eau potable communautaire provenant d'une source d'eau améliorée • Trajet aller-retour pour aller chercher l'eau de moins de 30 minutes, temps d'attente compris	• Forage ou source de bonne qualité sanitaire à proximité des foyers
Source d'eau limitée	• Eau potable provenant d'une source améliorée • Trajet aller-retour pour aller chercher l'eau de plus de 30 minutes, temps d'attente compris	• Forage ou source de qualité sanitaire suffisante mais éloignés et surexploités
Source d'eau non améliorée	• Eau potable provenant d'une source non protégée	• Puits creusé manuellement ou source non protégés

Source : à partir d'OMS/UNICEF (2017)

Dans la plupart des pays du monde, seules les eaux souterraines peuvent permettre, de façon concrète et abordable, de fournir un accès de base à l'eau aux populations rurales non desservies

4.3.2 Statistiques relatives à l'utilisation des eaux souterraines en zones rurales

Les statistiques relatives à l'utilisation des eaux souterraines en zones rurales proviennent en grande partie des estimations de la population rurale et du taux d'utilisation de l'eau à usage domestique par habitant hors réseau de distribution. Alors qu'en Europe du Nord, les services d'eau fournissent un approvisionnement en eau par réseau à de nombreux villages, il n'existe aucun service de ce type dans les zones rurales de la plupart des pays du monde ; les eaux souterraines jouent alors un rôle essentiel pour répondre de manière fiable à la demande en eau.

Partout dans le monde, les puits privés jouent également un rôle considérable dans l'approvisionnement en eau à usage domestique (Healy et al., 2020). Par exemple, le Mali compte plus de 170 000 puits familiaux traditionnels privés tandis que l'on estime à plus de 85 % la part des foyers éthiopiens, malawiens et zambiens qui dépendent de puits privés pour leur approvisionnement en eau potable (Sutton et Butterworth, 2021).

4.3.3 Défis à venir

L'approvisionnement en eaux souterraines des communautés rurales ne va pas sans difficultés. Des études récentes menées en Éthiopie, au Malawi et en Ouganda ont montré que moins de 50 % des puits forés fonctionnaient de façon sécurisée et que près de 25 % d'entre eux étaient contaminés par des agents pathogènes (MacDonald et al., 2019). Les raisons derrière ces dysfonctionnements sont complexes : ils tiennent notamment à des problèmes d'ingénierie et de conception ainsi qu'à des lacunes dans l'entretien et la gestion à long terme de la distribution d'eau.

Pour y remédier, il convient de donner la priorité à l'entretien des services existants, d'accroître la qualité des matériaux comme d'améliorer la conception et la construction grâce à la sensibilisation et au renforcement des capacités. On estime que la contamination persistante des approvisionnements en eau souterraine en zones rurales par des agents pathogènes touche environ 30 % des installations. Bien que possible, le traitement par désinfection est rarement réalisable au niveau des villages. La coexistence de systèmes d'assainissement *in-situ* et de sources d'eaux souterraines est un sérieux problème dans le cas des sources peu profondes, en particulier dans les villages les plus densément peuplés. La mauvaise qualité de construction des forages, qui permet aux eaux de surface contaminées de s'y diffuser, reste un problème persistant (Danert et al., 2020).

Dans la plupart des pays du monde, seules les eaux souterraines peuvent permettre, de façon concrète et abordable, de fournir un accès de base à l'eau aux populations rurales non desservies. Or, 11 % de la population mondiale n'a toujours pas accès aux services d'eau les plus élémentaires (UNICEF/OMS, 2019), si bien que l'utilisation des eaux souterraines pour fournir à ces personnes des services d'eau viables constitue une priorité absolue. La réalisation de forages peu profonds équipés d'une pompe manuelle a encore un rôle à jouer dans le développement rapide des services d'eau dans les villages et doit s'accompagner d'une plus grande attention à leur entretien. À terme, l'objectif est que tous les foyers disposent d'un accès à l'eau, ce qui implique un passage progressif des pompes manuelles communautaires à une distribution d'eau en réseau, mais toujours à partir des eaux souterraines. L'emploi d'énergie solaire pour le pompage présente de multiples avantages potentiels en matière de sécurité de l'eau et de réduction des émissions à zéro. Mais cette transition repose sur la capacité des forages à fournir des rendements plus élevés (> 100 m³/jour) de manière durable, ce qui nécessitera un investissement considérable dans la compréhension hydrogéologique des lieux afin de permettre un meilleur choix de l'emplacement des forages.

4.4 Préoccupations environnementales

4.4.1 Les menaces sur la durabilité

Les principaux obstacles à l'utilisation durable des eaux souterraines aux fins de l'approvisionnement en eau des zones urbaines sont :

- Un manque de ressources en eau dans le cas des grandes villes ;
- Une dégradation fréquente de la qualité causée par un assainissement *in-situ* insuffisant, le stockage non étanche des hydrocarbures, le rejet incontrôlé d'effluents d'origine industrielle et municipale et les décharges sauvages de déchets solides (AIH, 2015 ; Lapworth et al., 2017) ;
- Une tendance à la surexploitation des ressources en eaux souterraines dans les zones urbaines où les compagnies d'eau sont responsables d'une grande partie des extractions, ce qui peut entraîner un affaissement des sols susceptible d'affecter les infrastructures urbaines et de causer des intrusions d'eau salée ;
- La présence de niveaux élevés de traces de contaminants naturels (tels que l'arsenic et le fluorure) dans les eaux souterraines, en particulier en Asie du Sud et en Afrique de l'Est (Foster et al., 2020b).
- Les établissements urbains se forment souvent sur les plaines côtières et l'ensemble des zones côtières mondiales devrait compter un milliard d'habitants au cours des prochaines décennies. Dans ces zones, la surexploitation des ressources en eaux souterraines entraîne une grave exposition des aquifères à l'intrusion d'eau salée à grande échelle — un phénomène qui sera exacerbé par l'élévation du niveau de la mer dû au changement climatique.

Les problèmes les plus graves se posent dans les zones urbaines où la couverture du réseau d'égouts est réduite et où la plupart des déchets fécaux domestiques sont déversés dans des latrines à fosse

Les problèmes environnementaux liés à l'exploitation des eaux souterraines peuvent être relatifs à :

- L'affaissement des sols causé par l'affaissement des aquitards et de leur matière, entraînant un tassement important des fondations des bâtiments ainsi qu'un risque accru d'inondation dans les villes côtières, et qui résulte de la surexploitation des aquifères urbains et de la baisse du niveau de leurs nappes (comme à Bangkok et à Beijing) ;
- L'inondation par les eaux souterraines, qui provoque l'inondation ou le soulèvement de structures enterrées (caves profondes, tunnels de transport, etc.), en raison de la remontée du niveau de la nappe après l'arrêt du pompage des eaux souterraines dans les aquifères urbains.

Encadré 4.5 La forte dépendance de Lusaka envers les eaux souterraines comporte des risques importants

Lusaka a enregistré une croissance démographique fulgurante, passant de 0,5 million d'habitants en 1978 à 2,8 millions en 2018. Historiquement, la ville a toujours dépendu des eaux souterraines locales pour son approvisionnement en eau. En 2018, les services d'eau exploitaient 228 puits pour fournir environ 140 Ml/jour à la population ; en complément, une station de traitement des eaux fluviales produisait 80 Ml/jour. La compagnie d'eau municipale fait toujours face à des pertes d'eau élevées et à une perception défaillante des recettes, mais elle a fait le choix d'une « initiative en faveur des pauvres » en forant des puits autonomes visant à alimenter des kiosques à eau à un prix subventionné de 0,25 dollar EU/m³ (soit 40 à 70 % du tarif normal).

De plus, on recense des milliers de puits privés susceptibles de prélever jusqu'à 300 Ml/jour. Dans les zones périurbaines à faible revenu, la plupart des foyers utilisent encore des puits creusés peu profonds là où le niveau de la nappe se trouve à moins de 3 mètres de profondeur. Mais la formation calcaire dolomitique dans laquelle ces puits sont creusés est très vulnérable à la pollution par les eaux usées urbaines et les effluents industriels (bien que son rendement soit très élevé). Dans ces conditions géologiques, les latrines à fosse, qui constituent le système d'assainissement le plus courant, représentent un grave danger pour la qualité des eaux souterraines et sont même à l'origine de fréquentes épidémies de choléra. Si plusieurs grands projets visant à étendre le réseau d'égouts principal et à augmenter les capacités de traitement des eaux usées ont vu le jour, leur mise en œuvre dans les bidonvilles périurbains non aménagés s'avère difficile et coûteuse.

Source : adapté de Foster et al. (2020c, encadré 1, p. 126).

D'autres problèmes spécifiques, tels que la conservation des fondations sur pilotis en bois, nécessitent des mesures visant à maintenir le niveau des nappes des aquifères urbains peu profonds à l'intérieur de limites bien définies.

Dans certaines régions, l'intensité accrue des précipitations, due au changement climatique, a conduit à des taux exceptionnels d'infiltration des eaux souterraines ainsi que des aquifères perchés, donnant lieu à des inondations souterraines dans des zones où ce problème n'existait pas auparavant.

Quelle que soit leur finalité, les extractions intensives d'eaux souterraines soulèvent bien entendu de plus vastes préoccupations environnementales, dont la principale est la réduction des rejets, qui forment le débit de base des fleuves et alimentent les zones humides dépendantes.

4.4.2 Problèmes liés à l'assainissement et au drainage en zones urbaines

L'urbanisation a des effets considérables sur le « cycle des eaux souterraines », dont certains sont avantageux et bien d'autres néfastes. En effet, les taux de recharge des nappes et la qualité des eaux souterraines subissent, en grande partie, l'impact des systèmes d'assainissement et de drainage en zones urbaines.

La planification de l'assainissement et du drainage urbains doit accorder une attention particulière à la durabilité des ressources en eaux souterraines comme de leur vulnérabilité à la pollution. Dans les zones urbaines où les nappes d'eaux souterraines utilisées pour l'approvisionnement en eau sont libres, il importe de rediriger les eaux pluviales venant des toits et des zones pavées vers des bassins de rétention afin d'optimiser la recharge de ces nappes. Cependant, dans les villes en développement, passer d'un assainissement *in-situ* à un système d'égouts dans les quartiers établis est pratiquement impossible étant donné la densité de population qui offre peu d'espace et le coût souvent trop élevé. Face à ces contraintes, l'assainissement *in-situ* tend à devenir la norme ; sa conception et sa gestion se sont améliorées afin de permettre le traitement et l'élimination des boues fécales de façon sécurisée (Peal et al., 2020).

Les répercussions d'un assainissement insuffisant ou inapproprié sur les nappes souterraines varient considérablement en fonction de la vulnérabilité des différents systèmes aquifères à la pollution, et des types de boues fécales et de déchets solides concernés. Les problèmes les plus graves se posent dans les zones urbaines où la couverture du réseau d'égouts est réduite et où la plupart des déchets fécaux domestiques sont déversés dans des latrines à fosse. Généralement, les personnes les plus marginalisées sont les plus touchées ; ainsi, les femmes et les filles sont souvent touchées de manière disproportionnée, car elles sont plus exposées aux maladies dues aux agents pathogènes et aux toxines du fait de leur plus grande exposition aux eaux usées. Dans les villes des pays en développement et dans les grands établissements humains informels, la majorité de la population bénéficie d'un assainissement *in-situ* (tels les fosses septiques, divers types de latrines et de fosses d'aisance, voire la défécation en plein air), ce qui entraîne une pollution importante des aquifères peu profonds par les nitrates, les produits chimiques et pharmaceutiques. Les aquifères les plus vulnérables sont également touchés par la pollution des organismes pathogènes. Ce phénomène a été bien documenté dans certaines villes (encadré 4.5).

Il est urgent d'intégrer systématiquement, aux plans d'aménagement des villes, des études sur les eaux souterraines en zones urbaines à un niveau détaillé

Dans les pays en développement où le collecteur principal d'égouts constitue l'essentiel de l'infrastructure d'assainissement, les arrangements pris pour l'évacuation et la réutilisation des eaux usées restent largement insuffisants, posant de vrais risques de pollution importante pour les aquifères alluviaux périurbains. Il est donc urgent de mettre fin à l'irrigation des cultures ou l'irrigation d'agrément avec des eaux usées dans les zones de prise des puits publics, à moins de soumettre ces endroits à un traitement tertiaire.

Lorsque les déchets solides sont éliminés dans des décharges, en particulier lorsque celles-ci sont mal conçues et mal gérées, les eaux souterraines présentent localement une charge polluante plus variée et potentiellement plus toxique, pour peu que les décharges ne disposent pas de revêtements imperméables et d'une gestion des effluents. Bien qu'à l'échelle locale, la mauvaise gestion des eaux usées industrielles puisse entraîner des types de pollution des eaux souterraines plus graves, la pollution causée par les foyers et les collectivités constitue une menace bien plus importante dans les situations où l'assainissement *in-situ* et la mise en décharge des déchets solides prédominent.

4.4.3 La consommation d'énergie liée aux eaux souterraines

L'emploi de pompes motorisées pour les puits consomme beaucoup d'énergie et les coûts qui y sont associés montent en flèche dans les aquifères surexploités où le niveau de la nappe ne cesse de baisser. Toutefois, la consommation d'énergie des pompes reste modeste par rapport aux besoins énergétiques des stations de traitement des eaux sophistiquées et du transport, sur de longues distances, des eaux de surface. Ainsi, sous réserve de réduire au minimum la pollution des eaux souterraines par les nitrates, les solvants et les pesticides, l'ensemble des besoins énergétiques pour l'exploitation des sources et la distribution des eaux souterraines demeurent bien inférieurs à ceux encourus dans le cas des sources d'eaux de surface (sauf lorsque ces dernières sont alimentées grâce à la gravité).

Dans les zones où l'électrification est vaste, le réseau électrique constitue la source d'énergie la plus courante pour le pompage des eaux souterraines, mais en Afrique subsaharienne et dans certaines autres régions, les pompes à moteur diesel ou les pompes manuelles sont encore largement utilisées. Ces dernières années, l'utilisation de panneaux solaires pour produire l'énergie nécessaire au pompage des eaux souterraines a considérablement augmenté et cette tendance devrait se poursuivre à l'avenir.

En principe, le coût de la fourniture d'énergie pour la distribution des eaux souterraines en zones urbaines est couvert par le prix de l'eau, comprenant généralement une subvention des volumes minimaux pour les plus pauvres, subvention qui est compensée par une tarification plus élevée pour de plus larges volumes (voir WWAP, 2019, chapitre 5).

4.5 Le rôle des parties prenantes

Les extractions d'eaux souterraines destinées à l'approvisionnement des établissements humains impliquent plusieurs parties prenantes clés dont les agences nationales responsables des ressources en eaux souterraines et de l'approvisionnement en eau, les autorités locales compétentes en la matière et voire même les propriétaires de puits privés.
Les agences nationales sont responsables de :

- La réglementation de base régissant les extractions d'eaux souterraines ;
- La bonne coordination entre les acteurs nationaux, les agences de bassin, les organisations locales d'utilisateurs et, le cas échéant, les organismes d'aide et humanitaires s'intéressant aux eaux souterraines ;
- La mise en place de mécanismes efficaces de surveillance des eaux souterraines et l'application de la réglementation ;
- La coordination horizontale avec d'autres départements en ce qui concerne les eaux souterraines ;
- L'appui aux arrangements opérationnels pour les aquifères transfrontaliers.

Les agences municipales devront :

- Veiller au bon fonctionnement du système de permis pour l'eau au niveau local ;
- Rappeler l'attention que requièrent l'opération et la maintenance des puits ;
- Coordonner la gestion des déchets solides et des eaux usées afin de protéger les eaux souterraines ;
- Consulter et soutenir les associations locales qui travaillent sur l'assainissement et la gestion des déchets ;
- Faire prendre conscience aux agriculteurs de la nécessité de prévenir la pollution des eaux souterraines ;
- Encourager les établissements d'enseignement et de formation professionnelle (y compris les groupes de jeunes) à inclure l'approvisionnement en eau et la gestion des eaux souterraines dans leurs programmes.

4.6 En conclusion

1) Partout dans le monde, les eaux souterraines jouent sans conteste un rôle majeur dans l'approvisionnement en eau des zones urbaines ainsi qu'un rôle essentiel dans celui des villages ruraux et des établissements de personnes déplacées ; toutefois, plusieurs facteurs font que ce rôle est difficile à quantifier. Parmi ces facteurs, citons l'incapacité actuelle à différencier clairement les types de sources d'approvisionnement en eau dans les bases de données nationales et internationales ainsi que le caractère souvent irrégulier ou illégal des puits d'extraction privés, qui ne sont pas pris en compte dans les bases de données publiques.
2) Il est urgent d'intégrer systématiquement, aux plans d'aménagement des villes, des études sur les eaux souterraines en zones urbaines à un niveau détaillé afin de limiter les utilisations conflictuelles entre secteur public et secteur privé, de trouver des solutions efficaces pour l'approvisionnement en eau des établissements de personnes déplacées et de prévenir les problèmes environnementaux et sociaux imprévus et coûteux liés à l'utilisation des eaux souterraines à des fins d'approvisionnement.

3) Les services de distribution d'eau doivent s'engager, de manière plus consistante, à protéger leurs sources et leurs puits d'approvisionnement en préconisant des restrictions sur l'emploi des terres (notamment par rapport aux cultures agricoles et à la construction de logements) dans les zones de captage des eaux souterraines afin de préserver la santé du public et réduire le coût de la distribution de l'eau.

4) Les impacts de la surexploitation des eaux souterraines aux fins de l'irrigation des cultures et ceux de leur pollution par les activités agricoles et industrielles (voir chapitres 3 et 5) sont particulièrement préoccupants vis-à-vis de la durabilité et du coût des eaux souterraines pour l'approvisionnement en eau des populations. De même, il convient de souligner l'importance des effets de la pollution due à un assainissement insuffisant ou inapproprié, perturbant les sources d'eaux souterraines elles-mêmes, ainsi que les risques de contamination causés par une mauvaise conception des puits et/ou une complétion inappropriée.

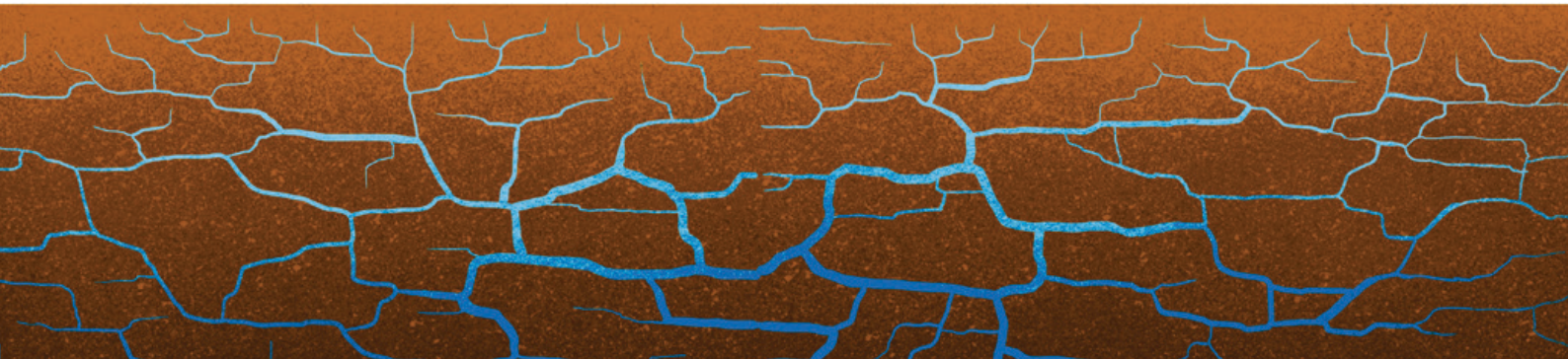
5) Il est urgent de promouvoir une coopération étroite, en matière de surveillance des eaux souterraines en zones urbaines, entre les principales parties prenantes, à savoir les services d'eau, les agences environnementales, les autorités municipales et les associations locales d'utilisateurs. Les bases de données résultant de cette activité de surveillance conjointe doivent être consultables en libre accès. En parallèle, il est nécessaire d'établir des cadres de collaboration à long terme entre les services d'eau en zones urbaines et les centres de recherche universitaires locaux afin d'enrichir la compréhension des ressources en eaux souterraines.

Chapitre 5

Eaux souterraines et industrie

ONUDI
Helmut Krist et John Payne

Avec les contributions de Christian Susan (ONUDI), Cate Lamb et Laureen Missaire (CDP)



5.1 Contexte

Les secteurs de l'industrie et de l'énergie connaissent généralement très bien ce qui se trouve au niveau du sol et au-delà. Les rivières, les lacs et la variabilité climatique peuvent être évalués tout comme les risques qu'ils peuvent représenter pour la viabilité des entreprises. Toutefois, les eaux souterraines se trouvant dans les sous-sols sont souvent littéralement oubliées. Cette négligence s'avère surprenante étant donné que ces secteurs dépendent souvent d'un approvisionnement autonome dont la composition découle des eaux souterraines en de nombreux endroits. Si les eaux souterraines peuvent fournir des ressources fort utiles et parfois peu exploitées au secteur industriel, elles doivent néanmoins être gérées de manière durable en concertation avec les autres parties prenantes. Il s'agit là d'une ressource essentielle pour de nombreuses industries, qui contribuent de fait à l'emploi et à la croissance économique.

Au nombre des industries qui prélèvent des eaux souterraines figurent l'industrie manufacturière, les industries minières, pétrolières et gazières, la production électrique, l'ingénierie et la construction. D'autres industries dépendent fortement des eaux souterraines pour leurs chaînes d'approvisionnement ; c'est le cas, entre autres, des secteurs de l'habillement, de l'alimentation et des boissons. Leurs extractions combinées peuvent entraîner plus de concurrence ou d'interactions entre les différentes industries ainsi qu'avec d'autres secteurs et communautés de même qu'avec l'environnement naturel, provoquant parfois des conséquences inattendues telles qu'une baisse extrême du niveau des nappes souterraines, la pollution de celles-ci ou des affaissements de terrain (PNUE, 2019).

5.2 L'extraction et l'emploi des eaux souterraines dans l'industrie

5.2.1 Les volumes

Les statistiques relatives à l'extraction d'eau et à son utilisation par l'industrie sont particulièrement rares. Les secteurs de l'industrie et de l'énergie prélèvent 19 % des ressources mondiales en eau douce (Aquastat, n.d.). Ce pourcentage a trait à l'eau obtenue de façon autonome (ce qui inclut l'eau souterraine). Les données révèlent également des différences considérables entre les régions, les prélèvements industriels variant de 5 % en Afrique à 57 % en Europe. Cependant, les données d'Aquastat ne sont pas réparties selon les extractions industrielles d'eaux souterraines. De telles données ne sont disponibles que dans des pays industrialisés à revenu élevé. L'Institut d'études géologiques des États-Unis (Dieter et al., 2018) indique qu'en ce qui concerne l'utilisation industrielle autonome aux États-Unis, la quantité totale d'eau prélevée a considérablement diminué de 1985 à 2015 (figure 5.1) tandis que les eaux de surface en composent la majeure partie. Selon une autre estimation, les eaux souterraines comptent pour 27 % des eaux extraites dans le monde pour la fabrication industrielle (Döll et al., 2012)[11].

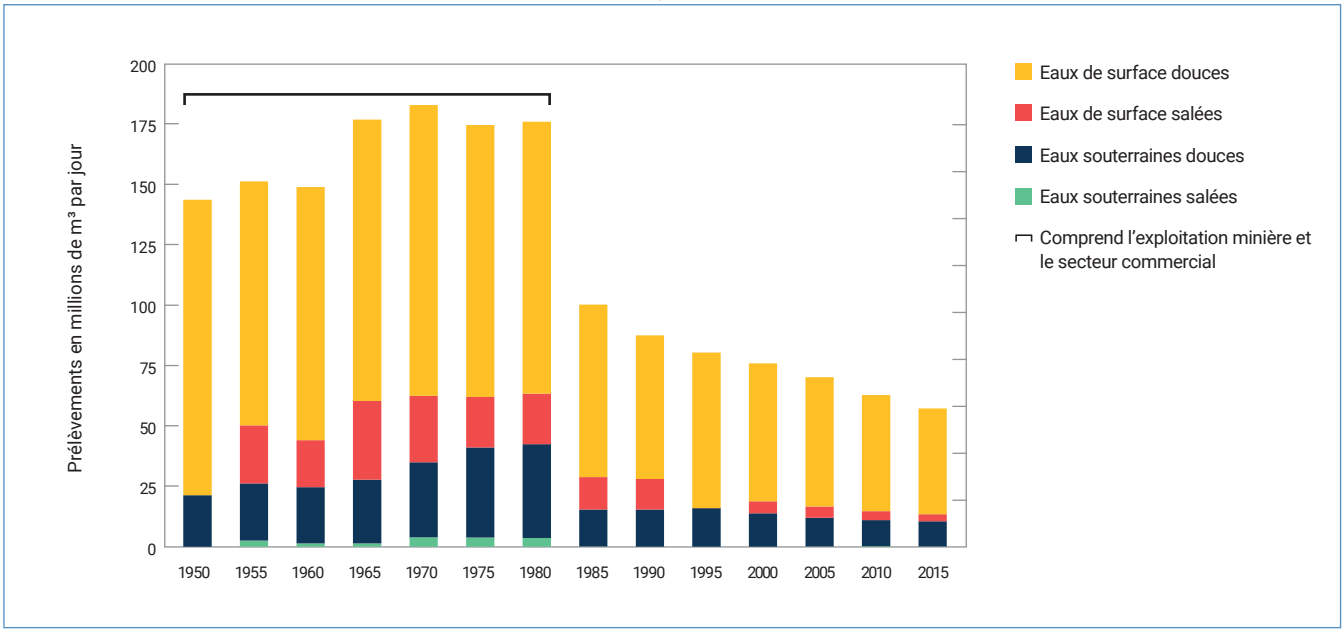
Les quinze pays ayant extrait annuellement les plus grandes quantités d'eau souterraine en 2010 sont présentés dans le tableau 5.1, ce qui prouve que le volume d'extraction d'eaux souterraines par l'industrie fluctue considérablement, allant de 1 à 48 % selon les pays.

Des données plus récentes datant de l'année 2015 (tableau 5.2) mettent en évidence plusieurs de ces mêmes pays et l'évolution de leurs extractions totales d'eau, la Chine et l'Indonésie dépassant largement les économies réalisées par les autres pays.

La disponibilité réduite des ressources en eaux souterraines peut être un obstacle au développement industriel étant donné que certaines industries font davantage usage des eaux souterraines que des eaux de surface. Dans certains cas, les eaux souterraines sont utilisées pour préserver les ressources en eaux de surface pour les populations locales –- surtout dans les régions pauvres en eau –- afin qu'elles puissent s'en servir pour leur alimentation quotidienne. L'industrie d'ennoblissement textile au Pakistan et dans d'autres régions pauvres en eau en est

[11] Selon des données non publiées du CDP 2020, 39 % d'entreprises issues de tous les secteurs d'activité dans le monde ont déclaré avoir réduit leurs prélèvements d'eaux souterraines par rapport à l'année précédente (2019), 30 % ont déclaré utiliser à peu près la même quantité d'eau et 24 % ont déclaré avoir augmenté leurs prélèvements.

Figure 5.1 Prélèvements d'eau effectués par l'industrie de façon autonome aux États-Unis



Source : adapté de Dieter et al. (2018, fig. 17F, p. 53).

Tableau 5.1 Les quinze pays étant estimés avoir extrait annuellement les plus grandes quantités d'eaux souterraines (2010)

Pays	Population en 2010 (en milliers de personnes)	Extractions d'eaux souterraines			
		Estimation de l'extraction d'eaux souterraines en 2010 (en km³/an)	Répartition par secteur		
			Part des extractions d'eaux souterraines pour l'irrigation (en %)	Part des extractions d'eaux souterraines pour un usage domestique (en %)	Part des extractions d'eaux souterraines pour l'industrie (en %)
Inde	1 224 614	251,0	89	9	2
Chine	1 341 335	112,0	54	20	26
États-Unis d'Amérique	310 384	111,7	71	23	6
Pakistan	173 593	64,8	94	6	0
Iran	73 974	63,4	87	11	2
Bangladesh	148 692	30,2	86	13	1
Mexique	113 423	29,5	72	22	6
Arabie saoudite	27 448	24,2	92	5	3
Indonésie	239 871	14,9	2	93	5
Turquie	72 752	13,2	60	32	8
Russie	142 985	11,6	3	79	18
Syrie	20 411	11,3	90	5	5
Japon	126 536	10,9	23	29	48
Thaïlande	69 122	10,7	14	60	26
Italie	60 551	10,4	67	23	10

Source : Margat et Van der Gun (2013).

Tableau 5.2
Les neuf pays ayant extrait annuellement les plus grandes quantités d'eau à usage industriel (km³/an)

Pays	2015	Variation absolue depuis 1965
États-Unis d'Amérique	248,4	-55,5
Chine	133,5	+87,8
Russie	39,6	-7,9
Canada	33,1	-2,9
Allemagne	32,6	-5,2
Indonésie	24,7	+24,3
France	21,6	-2,9
Inde	17,0	+1,8
Italie	16,3	+7,3

Source : Ritchie et Roser (2017) à partir d'Aquastat.

des exemples. L'industrie d'ennoblissement textile de Karachi fait face à une pénurie extrême d'eau de procédé et les sources d'eaux souterraines précédemment disponibles sont épuisées. L'application de techniques à zéro rejet liquide (ZRL) constitue une solution possible pour que le fonctionnement des procédés d'ennoblissement textile se poursuive.

Les difficultés rencontrées dans l'installation d'une nouvelle usine Tesla dans le Brandebourg (Allemagne) en sont une autre illustration. En raison des ressources limitées en eaux souterraines de la région, la compagnie régionale de distribution d'eau a fait part de ses préoccupations concernant la façon dont la réalisation du projet pourrait affecter l'approvisionnement en eau potable, ce qui a suscité un débat sur la disponibilité des eaux souterraines dans la région (IGB, 2020). Cet exemple montre que déterminer une bonne répartition des eaux souterraines n'est pas un problème dont seuls souffrent les pays en développement.

Dans l'industrie, les eaux souterraines sont utilisées à différentes fins, notamment la fabrication, le traitement, le nettoyage, la dilution, le refroidissement et le transport des produits

5.2.2 La fabrication

Dans l'industrie, les eaux souterraines sont utilisées à différentes fins, notamment la fabrication, le traitement, le nettoyage, la dilution, le refroidissement et le transport des produits. Elles sont également utilisées par des fonderies, des raffineries de pétrole et par des industries de fabrication des produits chimiques, des produits alimentaires et des produits papetiers (CDC, n.d.). Certaines opérations industrielles sont fortement tributaires des eaux souterraines tandis que d'autres, à l'instar des industries minières, peuvent provoquer le déplacement ou l'épuisement de ces eaux par assèchement au bénéfice d'autres écosystèmes tels les systèmes d'eaux de surface.

En 2020, sur 1 375 entreprises manufacturières dans le monde qui ont fait rapport au CDP (anciennement Carbon Disclosure Project), plus de la moitié (54 %) déclaraient que leur activités directes impliquaient des eaux souterraines provenant des sources non renouvelables et renouvelables. Parmi celles-ci, 46 % avaient diminué leurs prélèvements d'eaux souterraines, 32 % les avaient maintenus au même niveau et 21 % avaient augmenté leurs prélèvements par rapport à 2019 (CDP, non publié).

L'eau de procédé

De nombreux procédés industriels emploient les ressources en eaux souterraines dans les endroits où les eaux de surface sont limitées en quantité, mais aussi lorsque la qualité de l'eau est primordiale. Les eaux souterraines sont souvent moins contaminées que les eaux de surface et nécessitent moins de traitement. Les industries spécialisées dans le textile et l'habillement, le cuir, la pâte à papier et le papier consomment beaucoup d'eau.

À titre d'exemple, le traitement par voie humide de 1 kg de tissu en coton nécessite 250 à 350 litres d'eau (Kiron, 2014). L'industrie de la tannerie utilise environ 170 à 550 litres d'eau par peau (Schwarz et al., 2017). Les prélèvements d'eau utilisée par l'industrie du papier en Europe pour la fabrication de la pâte à papier, du papier et du carton atteignaient environ 3 700 millions de m³ en 2012 (SpotView, 2018) dont 90 % provenaient des eaux de surface et 8,5 % des sources d'eaux souterraines. Ces opérations de traitement se font souvent grâce à l'obtention autonome d'eaux souterraines : ceci se produit non seulement dans les pays en développement, où la surveillance n'est pas toujours appropriée, mais aussi dans les pays industrialisés à l'instar des États-Unis.

L'industrie textile emploie de l'eau souterraine en grande quantité. Au Bangladesh par exemple, ce secteur d'activité s'approvisionne lui-même en eaux souterraines pour ses différentes unités de traitement par voie humide et a, de ce fait, désespérément besoin d'une gestion efficace de l'eau (Haque et al., 2021). La plupart des colorants, des produits chimiques spécialisés et des produits chimiques de finition sont appliqués aux substrats textiles grâce à des bains d'eau et des traitements par voie humide. Outre cela, la plupart des étapes de préparation des tissus, comme le désencollage, le nettoyage, le blanchiment et la mercerisation se font grâce à des systèmes aqueux et aux eaux souterraines (Kiron, 2014).

Comme le montre le tableau 5.3, le traitement de la laine et des tissus feutrés sont les opérations textiles les plus exigeantes en eau (le traitement de la laine demande une quantité médiane d'eau d'environ 280 l/kg). Les figures montrent également que la consommation d'eau dans cette industrie varie considérablement.

Tableau 5.3

Utilisation de l'eau pour le traitement des textiles aux États-Unis (en l/kg de production)

Utilisation de l'eau dans la fabrication textile			
Sous-catégorie de fabrication	**Utilisation d'eau minimale**	**Utilisation d'eau médiane**	**Utilisation d'eau maximale**
Laine	110	285	660
Étoffe tissée	5	110	510
Étoffe tricotée	20	80	380
Tapis	8	45	160
Pelote/Fil	3	100	560
Étoffe non tissée	2,5	40	80
Tissu feutré	33	210	930

Source : adapté de US EPA (1996, tableau 2-33, p. 65).

Tiruppur, en Inde, est un exemple de ville dans laquelle la qualité et la quantité des eaux souterraines ont subi l'impact négatif de l'industrialisation rapide, un problème particulièrement récurrent dans les pays en développement. La ville est fortement dépendante des activités intensives de traitement des textiles de même que des eaux souterraines comme source principale d'eau potable. Des échantillons ont montré que les eaux souterraines sont contaminées par le sel utilisé pour le traitement des textiles (Grönwall et Jonsson, 2017a).

Le lavage et le nettoyage

De nombreux procédés de fabrication nécessitent d'importantes quantités d'eau pour laver et nettoyer leurs produits en fin de chaîne de production afin d'éliminer les résidus de traitements chimiques. Ces produits chimiques persistent dans les effluents et doivent être traités afin de protéger l'environnement et la santé humaine. On ne dispose pas de données spécifiques concernant la quantité d'eau souterraine utilisée pour le lavage et le nettoyage dans ces différentes industries.

Les eaux souterraines ont un impact considérable sur l'ingénierie et le secteur de la construction

Le refroidissement

L'emploi des eaux souterraines à des fins de refroidissement dépend fortement de l'emplacement et du type d'industrie, variant donc considérablement d'un pays à l'autre. La production d'énergie primaire et celle d'électricité sont les industries qui requièrent les plus grandes quantités d'eau[12]. Les procédés consommant beaucoup d'énergie ont besoin de beaucoup d'eau de refroidissement. À titre d'exemple, les fonderies d'acier et de métal utilisent 30 m³ d'eau par tonne d'acier tandis que les raffineries utilisent 1,5 m³ d'eau pour assurer le traitement de 1 m³ de pétrole brut. Aux États-Unis, 15 % de l'eau utilisée par les procédés de fabrication des raffineries proviennent des eaux souterraines (Ministère américain de l'énergie, 2016)

5.2.3 Boissons et eau en bouteille

Les industries des boissons, de l'eau en bouteille et de l'eau minérale sont uniques dans la mesure où les eaux souterraines constituent leur matière première avant de devenir leur produit. D'après des études de marché, ce secteur devrait connaître une croissance annuelle de 8 % (Facts & Factors, 2020). Les sources d'eau minérale pour la consommation humaine nécessitent une attention particulière étant donné que leurs bassins versants et aquifères doivent être protégés de toutes les sortes de pollution microbiologique et chimique.

Les grandes entreprises internationales du secteur de l'alimentation et des boissons sont de plus en plus en concurrence, et en conflit, avec les communautés locales et les municipalités à propos de la quantité d'eau qui peut être prélevée sans épuiser les ressources locales en eaux souterraines et sans affecter les approvisionnements domestiques comme d'autres. Dans la ville de Guelph (Canada) par exemple, des habitants ont manifesté contre le renouvellement du permis d'extraction d'eau accordé à l'usine de mise en bouteille Nestlé située à proximité, à Aberfoyle, usine qui tire l'eau du même aquifère que le fait Guelph pour son approvisionnement. Cette opposition a donné lieu à un moratoire sur les permis (CBC, 2016). L'application de la norme AWS (International Water Stewardship) pourrait servir à résoudre les conflits à venir concernant les ressources communes en eaux souterraines (AWS, 2019).

Selon les données mondiales du CDP, 72 % des industries de fabrication des boissons ayant partagé leurs informations indiquaient, en 2020, que les eaux souterraines jouaient un rôle dans le déroulement de leurs opérations. Parmi ces entreprises, 26 % déclaraient que leurs prélèvements d'eaux souterraines étaient sensiblement les mêmes que l'année précédente (2019), 42 %, que leurs prélèvements avaient diminués, 18 %, que les leurs avaient augmenté et 8 % n'en étaient qu'à leur première année d'évaluation (CDP, non publié).

5.2.4 Ingénierie et secteur de la construction

Les eaux souterraines ont un impact considérable sur l'ingénierie et le secteur de la construction. Comme dans le cas des industries minières (voir section 5.4), il s'agit au mieux d'un inconvénient, au pire d'un problème majeur (trop d'eaux souterraines au mauvais endroit et au mauvais moment) et pour ces secteurs de l'industrie, il ne s'agit ni d'un actif ni d'une ressource invisible. Les constructions souterraines telles que les tunnels nécessitent souvent des assèchements temporaires ou permanents. Les excavations profondes et les bâtiments pourvus de grands sous-sols tels les caves et les parkings souterrains font face aux mêmes défis, encore exacerbés par les importants volumes à déplacer comme par les pressions résultant de charges hydrauliques élevées aux niveaux local ou régional. Contrairement à l'exploitation minière qui s'effectue principalement dans les zones plus reculées à partir de nappes souterraines relativement intactes, la construction se produit généralement en zones urbaines, où les eaux souterraines peuvent déjà être polluées et nécessitent un traitement lors de l'assèchement et avant leur rejet. Savoir où rejeter des quantités parfois importantes d'eau peut s'avérer problématique dans des zones peuplées, car pouvant toucher à la réglementation

[12] L'Agence internationale de l'énergie estime que les secteurs de l'industrie et de l'énergie (production d'énergie primaire et d'électricité) consomment chacune environ 10 % de la quantité totale d'eau prélevée dans le monde (AIE, 2016a).

et nécessiter des permis. L'assèchement temporaire et l'assèchement permanent peuvent de surcroît considérablement réduire les niveaux des nappes souterraines, perturber l'approvisionnement en eaux souterraines et accroître les coûts d'exploitation et d'entretien.

Dans les domaines de la mécanique des sols et du génie civil, les eaux souterraines doivent impérativement être prises en compte. Selon le principe de contrainte effective, la présence d'eau souterraine modifie la résistance du sol et les charges qu'il peut supporter. De plus, les fluctuations des niveaux des nappes souterraines (saisonnières et parfois dues à l'assèchement) ont un impact significatif sur la stabilité des pentes. À plus grande échelle, l'épuisement des aquifères et la baisse des niveaux des nappes souterraines peuvent provoquer des affaissements de terrain graves comme dans le cas bien connu de Jakarta, où des taux d'affaissement de 1 à 20 - 28 cm/an ont été observés à certains endroits (Abidin et al., 2011). Il faut de ce fait remplacer et réparer les infrastructures et les bâtiments — des travaux tous relatifs à l'ingénierie et à la construction. Dans d'autres lieux, les phénomènes karstiques générés par l'érosion souterraine des roches calcaires (carbonate) causée par des eaux souterraines acides laissent des cavités et des vides qui peuvent s'écrouler, provoquant l'effondrements de bâtiments et des pertes en vies humaines. Les dolines existant en Floride (États-Unis) en sont un exemple.

5.3 Industrie, qualité des eaux souterraines et pollution

5.3.1 Menaces industrielles pesant sur les nappes souterraines

Le rejet et l'infiltration d'effluents industriels non traités, ou partiellement traités, dans le sol, par le biais des puits d'injection par exemple, peuvent polluer les eaux souterraines et affecter ainsi d'autres utilisations en aval pour l'irrigation, l'eau potable et diverses industries. Les impacts négatifs de la contamination des sols et du lessivage, provenant de décharges industrielles anciennes et non aménagées ainsi que d'anciennes mines, peuvent porter atteinte à la santé humaine et à l'environnement. Cela peut se produire même lorsque les retombées de particules industrielles présentes dans les émissions atmosphériques atterrissent sur le sol et sont ensuite entrainées vers les nappes souterraines par l'infiltration des pluies.

Les contaminants industriels trouvés dans les eaux souterraines possèdent une multitude de caractéristiques physiques, chimiques inorganiques, chimiques organiques, bactériologiques et radioactives. Le tableau 5.4 présente certains contaminants les plus courants des nappes souterraines, les sources de pollution associées et leurs effets.

Tableau 5.4 Contaminants industriels des eaux souterraines les plus courants par source de pollution

Source de pollution	Type de contamination
Stations-service et garages	Benzène, autres hydrocarbures aromatiques, phénols, certains hydrocarbures halogénés
Élimination des déchets solides	Ammonium, salinité, certains hydrocarbures halogénés, métaux lourds
Industries métallurgiques	Trichloroéthylène, tétrachloroéthylène, autres hydrocarbures halogénés, métaux lourds, phénols, cyanure
Travaux de peinture et d'émaillage	Alkylbenzène, tétrachloroéthylène, autres hydrocarbures halogénés, métaux, certains hydrocarbures aromatiques
Industries du bois	Pentachlorophénol, certains hydrocarbures aromatiques
Blanchisseries	Trichloroéthylène, tétrachloroéthylène
Fabrication de pesticides	Divers hydrocarbures halogénés, phénols, arsenic
Élimination des boues d'épuration	Nitrates, divers hydrocarbures halogénés, plomb, zinc
Tanneries	Chrome, divers hydrocarbures halogénés, phénols
Exploration/extraction pétrolière et gazière	Salinité (chlorure de sodium), hydrocarbures aromatiques
Exploitation de mines métallifères et de mines de charbon	Acidité, divers métaux lourds, fer, sulfates

Source : adapté de AGW-Net/BGR/IWMI/CapNet/ANBO/IGRAC (2015, tableau 8.1, p. 9)

Les hydrocarbures font partie des contaminants des eaux souterraines les plus communs. En fonction de leur densité, ils flottent ou se mélangent aux eaux souterraines. Les hydrocarbures chlorés, tels ceux utilisés comme solvants ou pour le nettoyage à sec, peuvent être cancérigènes. Une petite quantité suffit à contaminer une grande quantité d'eau souterraine au-delà des normes de sécurité. Des métaux lourds, comme le chrome hexavalent provenant de l'industrie du revêtement, sont également dangereux. D'autres, comme l'arsenic, peuvent se trouver naturellement dans les eaux souterraines et compromettre leur convenance pour un usage industriel.

5.3.2 Lutter contre la pollution industrielle des eaux souterraines

Les secteurs de l'industrie et des mines sont dans une position privilégiée pour accroître l'efficacité de l'utilisation de l'eau, inciter à son recyclage et à son réemploi, et réduire sa pollution. Afin de réduire ou d'éviter les impacts négatifs liés à l'utilisation industrielle des eaux souterraines, les techniques et les méthodes de la production propre et économe en ressources (RECP) et le recours à des parcs éco-industriels (PEI) seront nécessaires pour atteindre la cible 12.4 des objectifs de développement durable (ODD) relative aux modes de consommations et de production durables. En appliquant le principe d'une économie circulaire, les chaînes de valeur économes en ressources permettront de minimiser la consommation de matières premières ainsi que celle d'eau et d'énergie.

Les secteurs de l'industrie et des mines sont dans une position privilégiée pour accroître l'efficacité de l'utilisation de l'eau, inciter à son recyclage et à son réemploi, et réduire sa pollution

Le cadre international qui régit les parcs éco-industriels (ONUDI/Groupe de la Banque mondiale/GIZ, 2021) stipule qu'un PEI doit accorder la priorité à une gestion, une utilisation, une efficacité et un traitement durables de l'eau. Les PEI emploient l'eau de manière responsable en prenant en considération les problèmes de pénurie d'eau au niveau local et les réservoirs d'eau en situation sensible. Un PEI devrait également viser à augmenter l'efficacité hydrique de ses entreprises résidentes et du parc tout entier. Plusieurs PEI situés dans des régions pauvres en eau sont obligés de puiser les quantités d'eau dont ils ont besoin dans les eaux souterraines à cause du manque d'eau de surface. Les eaux usées doivent être traitées et la circularité de l'eau doit être encouragée. Le recyclage de l'eau doit avoir la priorité sur les systèmes ZRL.

L'inventaire des émissions et des transferts de matières polluantes (IETMP) est un instrument utile puisqu'il permet de rendre compte des émissions provenant des installations industrielles dans l'eau comme dans l'atmosphère et dans le sol (OCDE, n.d.). La diffusion publique de ces informations, via des organisations telles que le CDP et la Global Reporting Initiative (GRI), s'est également révélée être un mécanisme efficace pour la stimulation et le suivi des mesures prises par les entreprises afin de réduire et d'éviter les impacts négatifs de l'utilisation industrielle des eaux souterraines.

Zéro rejet liquide (ZRL)

Le tout premier objectif de ZRL est de prévenir le rejet des eaux usées et ses impacts négatifs. ZRL a pour but de traiter les effluents afin de récupérer de l'eau propre et de la réutiliser dans des procédés industriels, ramenant ainsi la consommation d'eau à des niveaux proches de zéro. Il s'agit de ce fait d'une forme de recyclage de l'eau de fabrication pour lutter contre la pollution hydrique.

ZRL s'effectue par étapes ; d'abord, en préparant les effluents au traitement, soit par un traitement physicochimique conventionnel, une osmose inverse et/ou un traitement biologique. Ensuite, une série de traitements permettent d'éliminer la dureté, le limon, la turbidité et les matières organiques au point où il ne se produit plus d'encrassement des membranes.

Le Gouvernement indien a imposé, par voie législative, le ZRL à son industrie de fabrication textile et vestimentaire, en commençant par la région du Tamil Nadu en 2006. De nombreuses usines ont été fermées par la haute cour de cet État en raison de leur incapacité à respecter les exigences de conformité (Kiran et Rao, 2019). La politique de ZRL a été étendue à neuf

Le secteur minier possède une relation différente et plus directe aux eaux souterraines en comparaison de la plupart des autres secteurs industriels

états dans le bassin du Gange et est appliquée à cinq secteurs industriels : textile, pâte et papier, distilleries, tanneries et sucre. « Les évolutions récentes dans la recherche et le développement ont remplacé le ZRL par le concept de Rejets liquides 'minimaux' (MLD) qui permet de récupérer jusqu'à 95 % des rejets liquides. Ceci prend en compte le fait qu'atteindre l'élimination des derniers 3 à 5 % de rejets liquides aux fins du ZRL peut presque doubler le coût du traitement » (Grönwall et Jonsson, 2017b, p. 27).

Réhabilitation des eaux souterraines

Les techniques d'assainissement traitent les eaux souterraines polluées en éliminant au maximum les produits polluants ou en les transformant en produits inoffensifs.

Des technologies de traitement biologique, chimique et physique sont employées et souvent une combinaison d'entre elles. Les techniques de traitement biologique comprennent la bioaugmentation, la bioventilation, le biobarbotage, la bioaspiration et la phytoremédiation. Certaines techniques de traitement chimique incluent l'injection d'ozone et d'oxygène, la précipitation, la séparation par membrane, l'échange ionique, l'absorption de carbone, l'oxydation chimique aqueuse et la récupération améliorée des surfactants ; d'autres peuvent être mises en œuvre à partir de nanomatériaux. Les techniques de traitement physique courantes comprennent pompage et traitement, le barbotage aérien, l'extraction en deux phases et les techniques membranaires telles que l'osmose inverse.

5.4 Exploitation minière et eaux souterraines

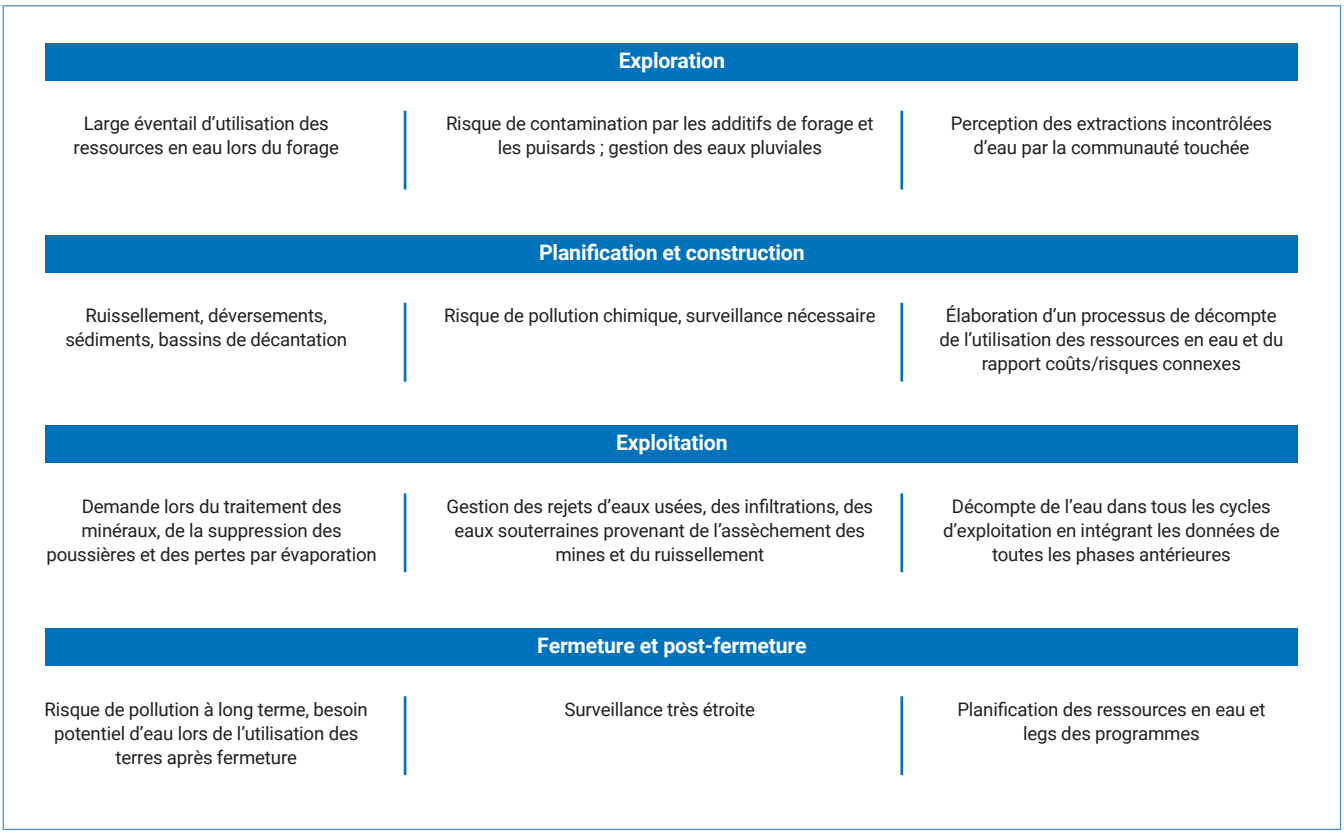
Le secteur minier possède une relation différente et plus directe aux eaux souterraines en comparaison de la plupart des autres secteurs industriels. Dans des zones semi-arides, il peut dépendre entièrement de ces eaux. Les interactions entre l'exploitation minière et l'eau douce se font généralement au travers des nappes souterraines et cette relation peut être antagoniste. D'une part, l'eau est un atout et une ressource utile lors de l'extraction et du traitement des minerais. D'autre part, elle peut devenir un assujettissement. Du côté avantageux de cette équation, on trouve le fait que l'eau sert à l'extraction, la séparation et le traitement du minerai, à la suppression de poussière, au transport des boues et au nettoyage. Côté contraignant, les eaux souterraines sont une nuisance et un inconvénient étant donné que les mines souterraines et les mines à ciel ouvert exigent, dans de nombreux cas, des assèchements fréquents ou continuels pour pouvoir fonctionner, ce à quoi s'ajoute le risque de contaminer un aquifère local, potentiellement source d'eau potable. L'évacuation de l'eau pose également des problèmes liés à son traitement si celle-ci a été contaminée par les activités minières. L'assèchement et le traitement peuvent entraîner une augmentation des coûts d'exploitation selon leur importance.

L'exploitation minière en Pologne par exemple nécessite l'assèchement de 1 km³ d'eau par an (Kowalczyk et al., 2010). Si l'on considère un foyer type de trois personnes qui utilise 230 m³/an[13], cette quantité équivaut à la consommation de plus de 4,3 millions de foyers, soit environ 13 millions de personnes. La figure 5.2 présente le parcours de l'eau tout au long du cycle minier.

La responsabilité liée aux opérations minières utilisant les eaux souterraines et un assèchement associé peut être onéreuse en termes de transport et de traitement de ces eaux souterraines ainsi qu'en dépenses connexes. Ces problèmes et impacts sont résumés dans le tableau 5.5. Il existe aussi d'autres problèmes connexes — la sécurité des travailleurs et des résidents locaux ainsi que les répercussions sur l'eau potable et l'environnement. Le fait qu'en 2020, seules deux entreprises minières ont rendu compte du fait que le lessivage de polluants dans les nappes phréatiques constituait un risque montre qu'il convient de se pencher plus sérieusement sur la question (CDP, non publié).

[13] Consommation moyenne en eau de la ville de Toronto. www.toronto.ca/311/knowledgebase/kb/docs/articles/revenue-services/customer-service/call-centre/call-centre/city-of-toronto-average-water-consumption.html

Figure 5.2 Utilisation de l'eau au cours du cycle de vie d'un projet minier



Source : AIH (2018, p. 2).

Tableau 5.5 Impacts de l'exploitation minière actuelle et passée sur les eaux souterraines

Nature des procédés / des actions	Impacts et risques pour les eaux souterraines
Extraction d'eaux souterraines pour les procédés miniers	Interférence avec les utilisateurs de puits préexistants ou épuisement permanent des aquifères, en particulier dans le cas d'aquifères non renouvelables ou faiblement rechargés dans les régions arides
Amoindrissement de la pression des eaux souterraines pour la stabilité des pentes	Généralement dans les formations peu perméables et principalement un problème géotechnique qui n'a qu'un impact limité sur le réseau d'eaux souterraines
Assèchement des galeries et des fronts d'accès aux mines	Dans les mines/carrières de grande taille et/ou profondes, risque d'apparition de grands cônes d'influence ayant des impacts sur les utilisateurs de puits et les écosystèmes dépendant des eaux souterraines
Arrivée soudaine d'eau souterraine dans les galeries minières	Perte potentielle de vies humaines, dégâts des biens d'équipement et mise en péril de la continuité de l'exploitation minière avec des effets sur les sources et les écosystèmes liés à l'eau
Fermeture de la mine avec remontée de la nappe phréatique	Risque de créer de nouvelles zones de déversement des eaux souterraines et de libérer des eaux souterraines de mauvaise qualité dans les systèmes d'écoulement régionaux
Lessivage *in-ssitu* des minéraux cibles	Risque de pollution des eaux souterraines par des lessivats fortement acides ou alcalins transportant le(s) minéral(aux) extrait(s)
Pollution accidentelle ou imprévue des eaux souterraines par les activités minières	Drainage des eaux d'exhaure et infiltration des résidus — infiltrations activant des sources de pollution et pouvant avoir un impact sur la qualité des eaux souterraines (en particulier dans les mines de charbon/lignite et de métaux lourds)

Source: IAH (2018, p. 2).

La contamination des eaux souterraines provient généralement de l'oxydation et de la dissolution de la pyrite provenant de minerais sulfurés (le drainage d'exhaure acide (AMD) est un vieux problème dans l'industrie minière) ou provenant du drainage et des lixiviats des eaux souterraines salines. Selon les résultats d'enquêtes nationales réalisées au cours des années 1990 et 2000, environ 9 000 km² de nappes souterraines étaient menacées de pollution par les métaux au Royaume-Uni (AIH, 2018). Les installations de stockage des résidus, partagées par de nombreuses mines, peuvent également entrainer la pollution des eaux souterraines (encadré 5.1).

Les exploitations minières peuvent utiliser les mêmes technologies que celles disponibles pour d'autres secteurs industriels afin de gérer l'eau, en réduire la consommation et en améliorer l'efficacité. Dans certains cas, de l'eau de moins bonne qualité peut être utilisée. Par exemple, l'eau saline peut être propice à certains procédés de séparation (Prosser et al., 2011). La gestion des eaux souterraines peut être incluse aux réglementations encadrant une approche de gestion intégrale relativement à l'octroi de permis (AIH, 2018). De plus, grâce à ses diverses activités, l'industrie minière peut disposer, en interne, de nombreuses données sur l'emplacement et l'étendue des aquifères ainsi que sur leurs caractéristiques. Si de telles données étaient publiées, elles pourraient compléter l'ensemble des savoirs et se révéler très précieuses pour les hydrogéologues, les gouvernements et les services de distribution d'eau.

5.5 Énergie, production électrique et eaux souterraines

Si les interactions entre eau et énergie ont donné lieu à une abondante littérature, il n'existe que peu d'informations sur la part que tiennent les eaux souterraines, soit dans la production d'énergie, soit dans l'emploi d'énergie pour extraire, déplacer et traiter les eaux souterraines. Comme souvent dans l'industrie, les données sur l'utilisation des eaux souterraines dans le secteur de l'énergie ne sont généralement pas ventilées entre utilisation globale et utilisation autonome de l'eau douce. Étant donné qu'elles seront plus disponibles dans les pays à revenu élevé, les données ne peuvent pas être facilement généralisées à d'autres pays, surtout lorsque les aquifères ne sont pas présents ou facilement accessibles.

Encadré 5.1 Avantages de la surveillance de la qualité des eaux souterraines : le cas d'AngloGold Ashanti au sein de Cerro Vanguardia S.A. (Argentine)

Cerro Vanguardia est la plus grande mine d'or et d'argent, en taille et en capacité de production, de la Patagonie en Argentine. Sa structure d'exploitation comprend une installation de stockage des résidus, dans laquelle le résidu minier est déposé en permanence sous forme de boue contenant de l'eau et des déchets/résidus. La boue se sépare dans l'installation de stockage et l'eau, qui contient des traces de cyanure résiduel, est récupérée en continu afin d'être réutilisée dans le processus d'extraction de l'or. Les installations de stockage sont entourées d'un réseau de puits de surveillance qui permettent de vérifier si les résidus issus du procédé ont une incidence sur les eaux souterraines. Le programme de surveillance évalue la présence de métaux lourds et de cyanure.

En 2003, la surveillance régulière de l'eau a permis d'identifier un pic isolé de concentration en cyanure dans l'un des puits autour des installations de stockage. Les recherches ont permis de déceler une veine de quartz dans le substrat rocheux qui servait de conduit au cyanure pour pénétrer dans les eaux souterraines. Une importante opération de terrassement a été lancée pour exposer la veine sous la digue de résidus miniers et la recouvrir d'une épaisse couche de polyéthylène haute densité (PEHD) afin d'éviter l'infiltration d'eau vers le bas. Ce revêtement en PEHD était composé de deux couches, une série de capteurs électroniques ayant été installés entre, afin de détecter les infiltrations à travers les couches. La surveillance régulière des eaux souterraines effectuée depuis l'installation du PEHD indique que le revêtement empêche d'autres infiltrations de cyanure dans les eaux souterraines.

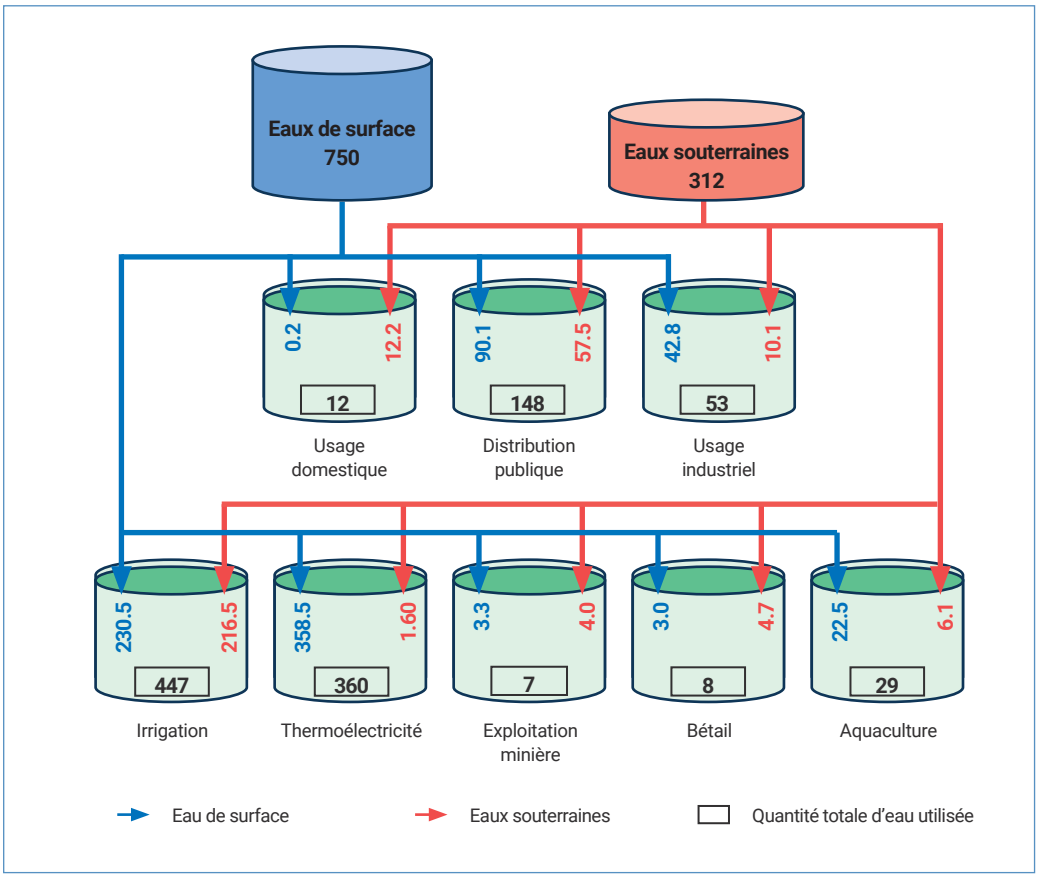
Source : adapté de ICMM (2012, p. 28 à 29).

5.5.1 Utilisation des eaux souterraines dans le secteur de l'énergie

Certaines données nationales ont été recueillies dans les pays à revenu élevé. La figure 5.3 donne la répartition des utilisations d'eau aux États-Unis pour l'année 2015 (USGS, n.d.). Elle indique que les eaux souterraines représentent environ 29 % de toute l'eau douce utilisée et que seul 0,5 % de ces 29 % est utilisé pour la production d'énergie thermoélectrique[14] tandis que l'industrie en utilise 3,2 %, la majorité (70 %) allant à l'irrigation.

Figure 5.3

Sources et utilisations de l'eau douce aux États-Unis, 2015



Note : les données sont exprimées en millions de m³ par jour.

Source : adapté de USGS (n.d.).

Le Canada mène une enquête bisannuelle sur les eaux industrielles qui fournit nombre de détails sur l'utilisation de l'eau, y compris l'utilisation des eaux souterraines pour la production d'énergie (Statistique Canada, n.d.). Le tableau 5.6 présente les données du secteur thermoélectrique pour l'année 2017. Force est de constater que, comme pour les États-Unis, les eaux souterraines ne représentent qu'un infime pourcentage des quantités totales d'eau utilisées à l'échelle mondiale. L'analyse non publiée du CDP à partir des données mondiales pour l'année 2020 a révélé que, sur les 37 entreprises de production d'électricité qui ont communiqué des informations sur leur usage de l'eau, 57 % dépendaient des eaux souterraines (CDP, non publié).

Les données sur l'emploi des eaux souterraines dans la production d'énergie primaire, comme le pétrole et le gaz, ne sont pas aisément disponibles. Toutefois, en 2014, la production d'énergie primaire a utilisé 12 % de l'ensemble des extractions d'eau pour le secteur de l'énergie (AIE, 2016a). L'analyse non publiée du CDP des données de l'année 2020 révèle que sur les 52 entreprises de pétrole et de gaz ayant communiqué des informations sur l'eau, 85 % dépendaient des eaux souterraines (CDP, non publié).

[14] « Les prélèvements pour l'énergie thermoélectrique étaient de 133 Bgal/j [500 Mm³/j] en 2015 et étaient aux niveaux les plus bas enregistrés avant 1970. Les prélèvements des eaux de surface représentaient plus de 99 pour cent du total des prélèvements pour l'énergie thermoélectrique et 72 pour cent de ces prélèvements d'eau de surface étaient issus de sources d'eau douce… Les prélèvements pour la production thermoélectrique représentaient 41 pour cent du total des prélèvements, tous usages confondus, et les prélèvements d'eau douce pour la production thermoélectrique représentaient 34 pour cent du total des prélèvements d'eau douce, tous usages confondus. » (Dieter et al., 2018, p. 1)

Tableau 5.6

Apports en eau par source dans la production thermoélectrique au Canada (2017)

Production d'énergie thermoélectrique	En millions de m³
Eau douce fournie par le secteur public, municipal	26,8
Eau douce fournie de façon autonome, masses d'eau de surface	20 505,3
Eau douce fournie de façon autonome, eaux souterraines	0,4
Eau douce fournie de façon autonome, autres	32,9
Eau saline fournie de façon autonome, eaux souterraines	0,0
Eau saline fournie de façon autonome, eaux de marée	2 700,9
Eau saline fournie de façon autonome, autres	1,1

Source : Statistique Canada (n.d.).

La production de biocarburants est très gourmande en eau et si la culture de ces biocarburants dépend de l'irrigation, les eaux souterraines constituent souvent une composante importante de leur production. Leur empreinte hydrique relative par unité d'énergie produite est significativement plus faible que celle d'autres sources d'énergie primaire. Tandis que, par exemple, la production de pétrole brut utilise 1,06 m³/GJ, la biomasse produite au Brésil utilise en moyenne 61 m³/GJ (Gerbens-Leenes et al., 2008).

5.5.2 L'énergie nécessaire à l'utilisation des eaux souterraines

Au sein de la relation qui unit eau et énergie, la composante eau fait l'objet d'une plus grande attention. Cependant, l'apport et l'utilisation de l'énergie dans le secteur hydraulique reçoivent moins de considération et, bien que l'Agence internationale de l'énergie (AIE) ait analysé cette problématique plus en profondeur (AIE, 2016a), la séparation des informations spécifiques aux eaux souterraines est néanmoins très limitée.

Dans son rapport, l'AIE estime que, pour l'année 2014, la quantité d'énergie requise pour le traitement, la transformation et le transport de l'eau est d'environ 120 Mtep[15] (environ 1 % de la consommation mondiale totale, soit 9 425 Mtep en 2014 (AIE, 2016b)), ce qui équivaut à peu près à la demande totale en énergie de l'Australie. L'électricité représente environ 60 % de ce total (environ 820 TWh ou 4 % de la consommation électrique totale à l'échelle mondiale)[16], soit environ la consommation électrique totale de la Russie. Environ 40 % de l'électricité employée pour le traitement, la transformation et le transport de l'eau sert à extraire des eaux souterraines et à prélever des eaux de surface[17]. Si ces estimations sont intégrées à l'estimation selon laquelle, à l'échelle mondiale, les eaux souterraines représentent environ un tiers des extractions d'eau, on peut conclure que l'extraction des eaux souterraines consomme environ 108 TWh par an, ce qui représente environ 0,5 % de la consommation électrique mondiale. Ceci peut sembler un chiffre faible, mais vue localement, la situation peut s'avérer très différente. L'Inde en est un cas extrême, dans la mesure où 60 % de l'électricité utilisée dans le secteur de l'eau sert à l'extraction des eaux souterraines. Ce pourcentage s'explique si l'on prend en considération le fait que l'Inde compte pour 26 % des eaux souterraines extraites mondialement (Margat et Van der Gun, 2013). Le pompage électrique des eaux souterraines est environ sept fois plus énergivore que le prélèvement des eaux de surface (en kWh/m³) (figure 5.4). La demande en électricité pour le pompage des eaux souterraines devrait augmenter avec la multiplication des extractions d'eaux souterraines, l'épuisement des

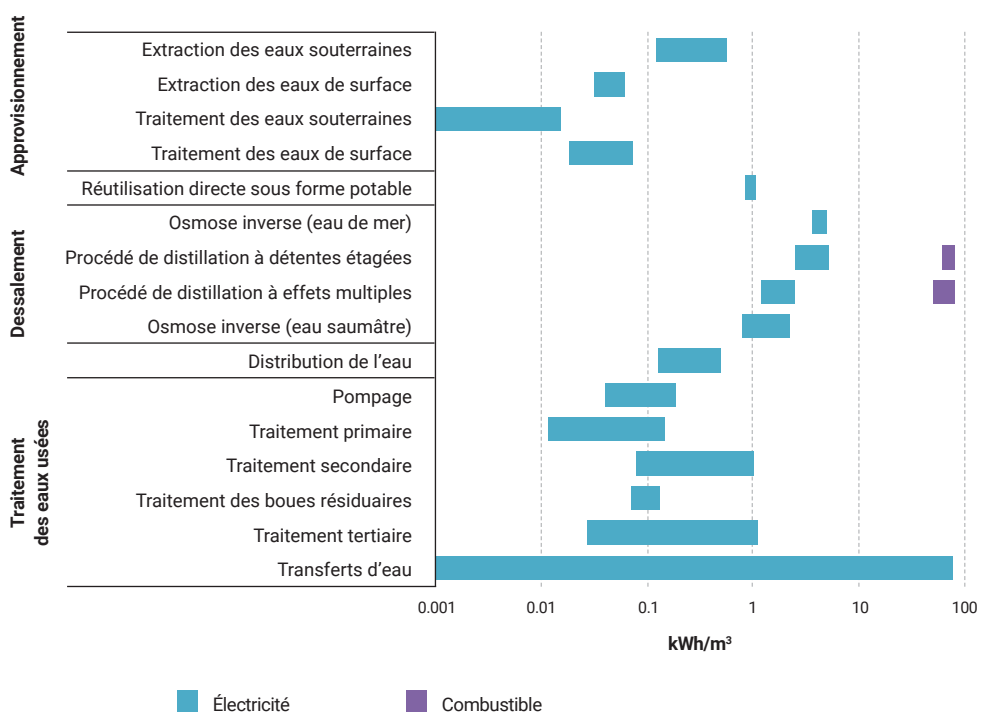
[15] Mtep = Million de tonnes équivalent pétrole ; 1 tep = 11,63 MWh

[16] Le reste se compose d'énergie thermique, principalement les pompes diésel pour le pompage agricole des eaux souterraines, et de gaz naturel pour les usines de dessalement au Moyen-Orient et en Afrique du Nord.

[17] Le traitement des eaux usées utilise environ 25 % (mais environ 42 % dans les pays développés) et la distribution utilise environ 20 %.

Figure 5.4

Énergie utilisée pour divers procédés dans le secteur de l'eau



Source : AIE (2016a, fig. 8, p. 28).
Tous droits réservés.

nappes et la baisse des niveaux d'eau qui y sont associés, en ajoutant l'abandon progressif du pompage au diésel. Cependant, l'intensité énergétique nécessaire à leur traitement diffère étant donné que les eaux souterraines sont généralement moins contaminées que les eaux de surface. Il convient également de noter que le dessalement est plus énergivore, et ce jusqu'à un ordre de grandeur, que l'extraction des eaux souterraines (figure 5.4).

5.5.3 L'énergie et la contamination des eaux souterraines

Même si le secteur de l'énergie n'a qu'une utilisation limitée des eaux souterraines, il peut avoir un impact profond sur la qualité de ces eaux. Le charbon utilisé dans la production thermoélectrique est réputé pour ses effets environnementaux délétères, telles les émissions de CO_2 et de mercure, ainsi que ses répercussions sur la qualité de l'air. De même, il a des effets non négligeables sur les eaux souterraines en raison des infiltrations à travers les décharges de cendres de charbon. Ce phénomène, dont les effets peuvent perdurer pendant de nombreuses années, a fait l'objet d'études aux États-Unis (encadré 5.2). Compte tenu du grand nombre de centrales thermiques au charbon dans le monde, il serait sans doute justifié de conclure que les répercussions sur les eaux souterraines peuvent en être importantes à l'échelle mondiale.

La fracturation hydraulique pour l'extraction du gaz naturel représente un autre facteur de risque important de contamination des eaux souterraines

La fracturation hydraulique pour l'extraction du gaz naturel représente un autre facteur de risque important de contamination des eaux souterraines, en particulier dans les aquifères peu profonds. Au rang des sources de pollution figurent les eaux usées provenant de l'eau de formation, de l'eau de reflux ainsi que des liquides de forage et de fracturation (AIE, 2016a). Les réglementations et les meilleures pratiques (y compris le recyclage et le réemploi) peuvent réduire la quantité d'eau requise comme les risques. Les solutions alternatives ou l'utilisation de mousse pour réduire l'utilisation de l'eau ont aussi des inconvénients.

Encadré 5.2 Les décharges de cendres de charbon : l'héritage de la pollution des nappes souterraines

Le charbon contient de nombreuses substances chimiques toxiques dont l'arsenic, le radium et d'autres éléments cancérigènes, plusieurs métaux susceptibles d'affecter le développement cérébral des enfants ainsi que de nombreux produits chimiques toxiques pour la vie aquatique. La combustion du charbon pour produire de l'électricité conduit à la concentration de ces substances toxiques dans les cendres de charbon résiduelles. Pendant une grande partie du XXème siècle, ces résidus ont été déversés dans des bassins à déchets et des sites d'enfouissement sans revêtements étanches, ce qui a permis l'infiltration et la contamination des eaux souterraines.

En 2015, l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis (US EPA) a fini de mettre au point une réglementation fédérale sur l'élimination des cendres de charbon : la *Loi sur les cendres de charbon* établissait des exigences aux fins de la surveillance des eaux souterraines. Les données de 2018, issues de 4 600 puits de surveillance des eaux souterraines, couvraient plus de 550 bassins et décharges de cendres de charbon, représentant plus de 75 % des centrales à charbon aux États-Unis. Les données ont révélé que les eaux souterraines sous une majorité de ces centrales (91 %) étaient contaminées, parfois à des niveaux importants. Outre l'arsenic et le lithium qui y sont généralement trouvés, la majorité des centrales exhibent des niveaux nocifs d'au moins quatre produits chimiques toxiques pouvant s'infiltrer par les cendres de charbon. De plus, le problème est aggravé par l'existence d'anciennes décharges de cendres de charbon qui ont été fermées et ne rentrent pas dans le champ de la réglementation.

Source : adapté de EIP (2019).

5.6 Industrie et responsabilité dans la gestion des eaux souterraines

L'industrie accorde de plus en plus d'attention aux risques encourus par son approvisionnement en eau douce et aux difficultés qui en résulteront. Dans la mesure où les eaux souterraines font partie de l'approvisionnement en eau douce, l'industrie doit s'intéresser de plus en plus à cette ressource, ou à son absence, car elle peut influencer, de manière significative, la viabilité commerciale, le retour sur investissement et les bénéfices. Cette prise de conscience est particulièrement essentielle dans les régions arides où l'industrie emploie davantage d'eau souterraine. Le rapport le plus récent du CDP indique qu'en ce qui concerne les risques pesant sur l'eau, les coûts de l'inaction (301 milliards de dollars EU) sont cinq fois plus élevés que ceux de l'action (55 milliards de dollars EU) (CDP, 2021). C'est le cas pour la plupart des secteurs, exception faite de la production électrique et la construction des infrastructures où des investissements importants sont actuellement réalisés pour faire évoluer les portefeuilles énergétiques. De plus, on estime que les opportunités commerciales d'investir dans la sécurité hydrique se chiffrent à 711 milliards de dollars EU.

L'industrie accorde de plus en plus d'attention aux risques encourus par son approvisionnement en eau douce et aux difficultés qui en résulteront

En 2018, on avait enregistré une diminution de 7 % du nombre d'entreprises qui prélevaient des eaux souterraines non renouvelables alors qu'en même temps, le nombre d'entreprises déclarant des extractions toutes sources confondues, y compris donc des eaux souterraines renouvelables, augmentait (CDP, 2018). Le rapport 2020 du CDP indique que « *près des deux tiers des entreprises interrogées réduisent ou maintiennent à tout le moins le niveau de leurs extractions d'eau* », mais seulement 4,4 % signalent des améliorations concernant la pollution de l'eau (CDP, 2021, p. 4). L'analyse non publiée des données de 2020 par le CDP suggère que le nombre d'entreprises qui maintiennent ou réduisent leurs extractions d'eaux souterraines renouvelables ou non renouvelables a atteint 25 % (721/2934) (CDP, non publié).

Pour mener des actions sur le site d'une usine donnée, eu égard aux risques sur les eaux souterraines, il existe de nombreuses technologies et pratiques susceptibles d'accroître l'efficacité de l'eau et d'en réduire l'emploi. Les audits de la consommation d'eau et l'évaluation des empreintes hydriques permettent d'identifier les éléments problématiques dans l'utilisation de l'eau, et des mesures axées sur des rejets zéro, la réutilisation et le recyclage de l'eau peuvent être mise en place pour combler les faiblesses. De telles mesures peuvent également être encouragées chez les entreprises de la chaîne d'approvisionnement. Si les eaux souterraines font partie du bilan hydrique, elles deviendront alors partie intégrante de ces mesures d'efficacité et pourraient être intégrées aux initiatives RECP. Ces efforts peuvent être

déployés à une plus grande échelle au niveau des PEI dans lesquels les industries collaborent de manière symbiotique autour de divers intrants et produits incontournables tels l'énergie, les déchets et l'eau. La prochaine étape doit concerner l'évolution vers une économie circulaire, qui pourrait fonctionner à l'échelle locale et régionale, dans l'espoir d'atteindre le niveau nationale, et dont l'emploi durable des eaux souterraines fera partie intégrante.

Au cours des dernières années, les instruments économiques ont été conçus dans une perspective plus large, les institutions financières prêtant aux entreprises accordant davantage d'attention aux risques hydriques, qui peuvent aussi affecter les eaux souterraines. Le CDP met en garde contre le fait que les risques hydriques peuvent menacer « *les réputations, les revenus et la stabilité financière* » des entreprises qui les ignorent (CDP, 2018, p. 11). Les institutions financières attendent que les entreprises « mettent la production et la consommation en cohérence avec la protection des ressources en eau » (p. 11). Selon le rapport du CDP pour 2020, 2 934 sur 5 537 entreprises (plus de la moitié) avaient divulgué des informations sur leur emploi de l'eau à la demande d'investisseurs ou d'entreprises clientes (CDP, 2021).

Toutefois, afin que le prélèvement et l'utilisation des eaux souterraines se fassent de façon durable, la coopération, le partage et les partenariats avec les nombreux autres parties prenantes en lien avec les eaux souterraines sont indispensable à la gestion globale de la ressource, c'est-à-dire la gérance (encadré 5.3). Cette approche prend en compte la valeur de l'eau à bien des égards, que ce soit d'un point de vue comptable et financier mais aussi d'un point de vue environnemental et socioculturel, en référence aux valeurs récréatives, culturelles et spirituelles (ONU, 2021). La figure 5.5 présente certains des principaux inducteurs de valeur propres aux entreprises. Plusieurs organisations assurent activement la promotion de la gérance de l'eau dans les entreprises et publient des directives. Il s'agit notamment de l'Alliance for Water Stewardship (AWS) et de CEO Water Mandate.

La définition de la géographie de la gérance implique aussi une autre dimension. Contrairement aux eaux de surface pour lesquelles les bassins fluviaux forment des territoires naturels de gérance, les limites des aquifères sont moins bien définies et souvent difficiles à déterminer. Ceux qui participent à la gérance des ressources en eaux souterraines peuvent appartenir à une zone beaucoup plus vaste et être beaucoup plus nombreux.

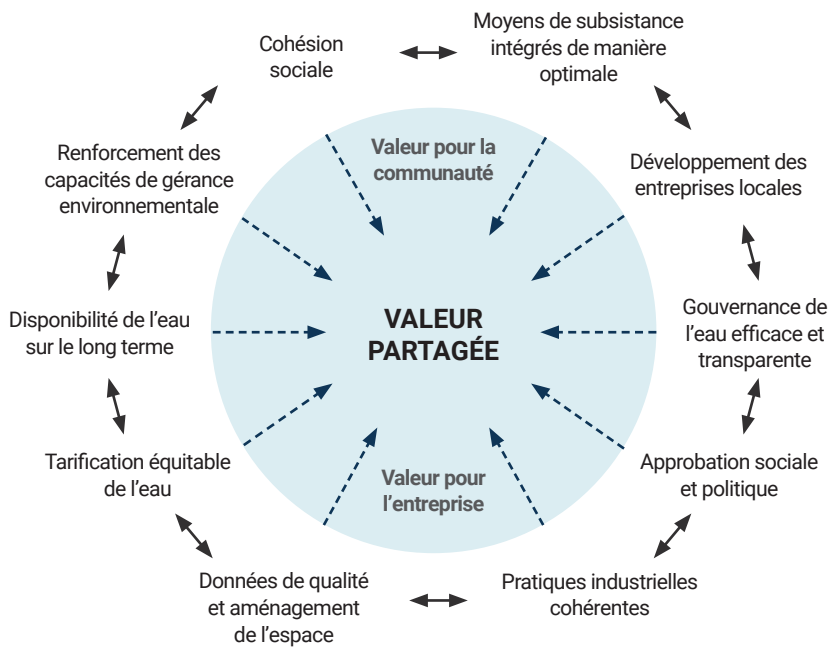
Encadré 5.3 Un partenariat entre PT Multi Bintang et l'ONUDI

Dans l'Est de Java, la société d'exploitation indonésienne d'Heineken, PT Multi Bintang a permis un partenariat public-privé, en coopération avec l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI), pour surmonter la pénurie d'eau. En s'appuyant sur les investissements pilotes de PT Multi Bintang et sur la mise en place d'Aliansi Air en tant que plateforme multipartite, le Fonds pour l'environnement mondial (FEM) a approuvé un projet de conversion en mars 2021. Avec un budget de 1,8 million de dollars EU approuvé par le FEM, des puits d'absorption, des projets agroforestiers et des forêts de bambous riveraines seront créés par le Ministère de l'environnement et des forêts et l'ONUDI. Ce projet permettra d'améliorer la rétention d'eau dans la zone de captage, améliorera la percolation de l'eau et augmentera l'alimentation des nappes souterraines. Il entraînera la conservation et la reconstitution des aquifères à raison d'environ 1 million de m³/an. Ces mesures ont été établies par des représentants du gouvernement, de la société civile, du milieu universitaire et du secteur privé lors d'un atelier participatif et inclusif entre les parties prenantes comme condition préalable au maintien de l'approvisionnement durable en eau pour les personnes et les entreprises. Au fur et à mesure de l'évolution du projet, des opportunités de conversion des quatorze autres bassins versants prioritaires, identifiés par le Gouvernement indonésien, seront déterminées. Ceci se fera en étroite coopération avec le Ministère de l'environnement et des forêts, la branche indonésienne de la Water Stewardship Alliance et la Water Resilience Coalition nouvellement établie, qui a permis de réunir les principales entités du secteur privé indonésien disposées à s'engager et à coopérer pour la gérance de l'eau.

Source : ONUDI (non publié)

Figure 5.5

Inducteurs de valeur pour la gérance de l'eau au sein des entreprises et des communautés



Source : SFI (2014, fig. 2, p. 9).

5.7 Aller de l'avant

Les secteurs de l'industrie et de l'énergie utilisent généralement moins d'eau que d'autres secteurs importants dans l'utilisation de l'eau tels que l'agriculture et les municipalités, et de fait moins d'eau souterraine. Cependant, ils peuvent avoir un impact substantiel sur la qualité des eaux souterraines par le biais des rejets, des déversements et le lessivage des déchets. Il ne s'agit pas de proposer que l'industrie et l'énergie cessent d'employer les eaux souterraines, puisqu'à certains égards, cette utilisation pourrait atténuer le stress sur les ressources en eau de surface au bénéfice d'autres utilisateurs. Les secteurs privés de l'industrie et de l'énergie ont la capacité nécessaire pour agir rapidement et les moyens de contribuer efficacement à l'emploi durable des eaux souterraines, qu'il s'agisse de la quantité et de la qualité, moyens qui font parfois défaut à d'autres secteurs, dont les municipalités.

Du fait de leur statut de propriétaire et de leurs structures organisationnelles, les acteurs de l'industrie et l'énergie exercent davantage de contrôle sur les volumes d'eau souterraine qu'ils peuvent utiliser. Par conséquent, ils peuvent agir avec plus d'agilité et de rapidité que les gouvernements. La réutilisation et le recyclage, les initiatives zéro rejets, les projets RECP et les PIE ont tous pour objectif d'économiser l'eau. Ces activités participent à la transition vers une industrie plus verte, aux priorités environnement, société et gouvernance (ESG) et à une meilleure gérance de l'eau par les secteurs industriel et énergétique. Elles peuvent s'intégrer aux améliorations de l'Industrie 4.0[18] (voir ONU, 2021, chapitre 6, p. 93) et aux plans et activités plus vastes de la société et des gouvernements, comme la Gestion intégrée des ressources en eau (GIRE), et nous aider à progresser vers des économies circulaires. Même le secteur financier exerce désormais une influence considérable dans le domaine de l'investissement durable ; cela devrait avoir un effet d'entrainement en favorisant les acteurs, notamment ceux de l'industrie et de l'énergie, qui ont besoin de financement et qui utilisent les eaux souterraines de manière durable, et en encourageant les autres à faire de même.

[18] L'Industrie 4.0 désigne la transformation numérique des secteurs industriels de fabrication et de production notamment, ainsi que des processus de création de valeur ajoutée.

Chapitre 6

Les eaux souterraines et les écosystèmes

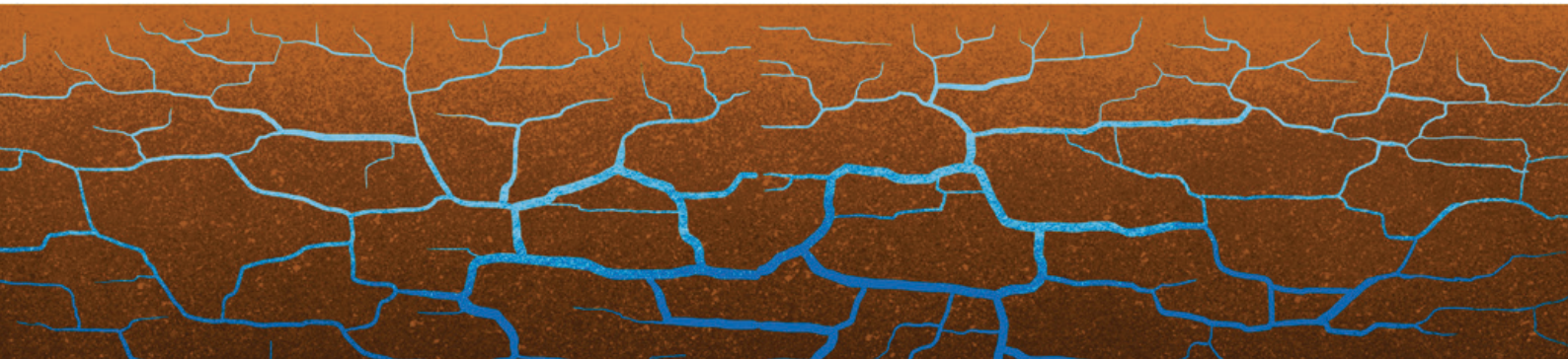
WWAP
Tom Gleeson, Xander Huggins* et Richard Connor

Pedro Arrojo-Agudo, *Rapporteur spécial sur les droits de l'homme à l'eau potable et à l'assainissement*, et Enric Vázquez Suñé**

Avec les contributions de Karen Villholth (IWMI), Melissa Rohde (TNC), Jac van der Gun (WWAP), David Kreamer et Marisol Manzano (AIH), Luciana Scrinzi et Giuseppe Arduino (UNESCO-PHI), Tales Carvalho Resende (UNESCO CPM), Nils Moosdorf (Université de Kiel), Virginia Walsh (WASD) et Astrid Harjung (AIEA)

* Institut mondial pour la sécurité de l'eau et Université de Victoria

** IDAEA-CSIC



6.1 Introduction aux écosystèmes dépendant des eaux souterraines

Les écosystèmes dépendant des eaux souterraines (GDE) sont des ensembles de plantes, d'animaux et de champignons qui dépendent du débit, de la température ou des caractéristiques chimiques des eaux souterraines pour satisfaire la totalité, ou une partie, de leurs besoins en eau (Murray et al., 2003 ; Foster et al., 2006 ; Kløve et al., 2011) (figure 6.1). Il existe une grande diversité de ces écosystèmes que l'on peut classer en trois catégories selon la façon dont les eaux souterraines se manifestent au sein de ceux-ci (Eamus et al., 2015 ; figure 6.2). Ces catégories comprennent :

- Les GDE aquatiques, qui dépendent de l'interaction entre les eaux souterraines et les eaux de surface, tels les sources, les zones humides et des estuaires, ainsi que de l'écoulement et du débit de base des eaux souterraines dans les fleuves, les cours d'eau, les zones humides et les zones côtières ;
- Les GDE terrestres, qui dépendent des eaux souterraines écologiquement accessibles ;
- Les GDE souterrains, qui dépendent des systèmes aquifères et karstiques, parmi lesquels se trouvent les zones hyporhéiques des fleuves et des plaines inondables.

Bien que de catégories différentes, les écosystèmes dépendant des eaux souterraines peuvent être étroitement liés les uns aux autres et dépendre de la même nappe souterraine, comme il en va par exemple de la végétation ripicole à proximité d'un fleuve et de l'écosystème fluvial lui-même. Les GDE contiennent des espèces endémiques qui dépendent des conditions de vie créées par les eaux souterraines. Ils peuvent également accueillir des établissements humains, des lieux de pratiques religieuses et culturelles, voire être à l'origine de conflits (Kreamer et al., 2015 ; ONU, 2021).

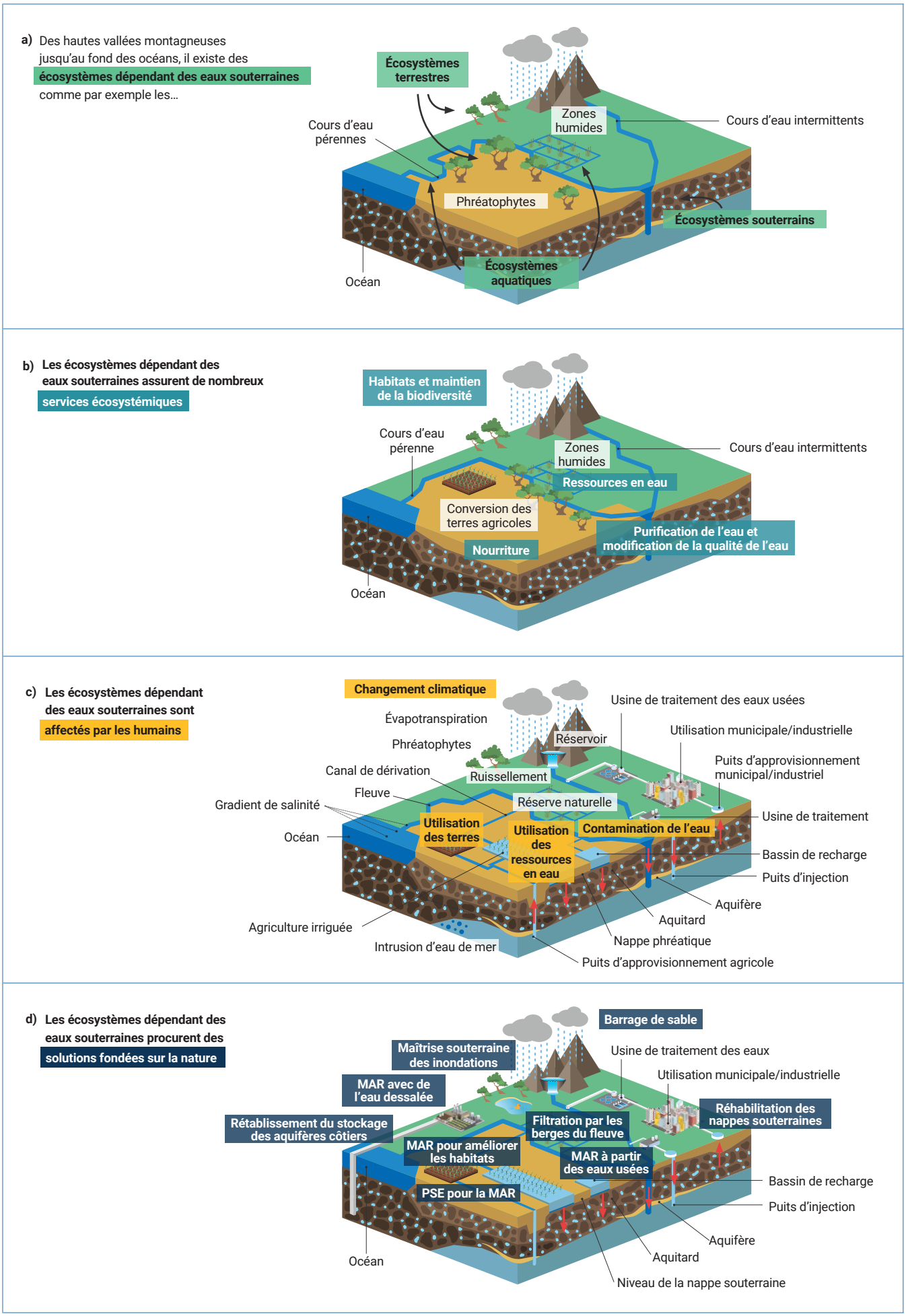
Figure 6.1

Exemple d'écosystème dépendant des eaux souterraines : vue aérienne des plaines inondables et des îles du delta de l'Okavango (Botswana)

Photographie : Vadim Petrakov/Shutterstock.

La dépendance à l'égard des nappes souterraines peut revêtir un caractère continu, saisonnier ou occasionnel, et se révèle lorsqu'une espèce est privée d'accès aux eaux souterraines trop longtemps avec une réaction négative, telle qu'une réduction de sa croissance ou de sa capacité de reproduction, ou une hausse de mortalité. Certaines espèces dépendent entièrement des eaux souterraines, en particulier celles qui dépendent de sources ou de la constance du débit de base des fleuves, des lacs ou des zones côtières. Mais, chez d'autres espèces, la dépendance envers les eaux souterraines peut être plus difficile à déceler dans la mesure où une combinaison de sources d'eau (comme les eaux souterraines, les eaux de surface, les précipitations, le flux de retour de l'irrigation, le ruissellement des eaux pluviales d'orage) permet de créer certaines conditions de vie à des saisons différentes ou à des stades différents du développement.

Figure 6.2 Interactions entre eaux souterraines, écosystèmes, activités humaines et solutions fondées sur la nature

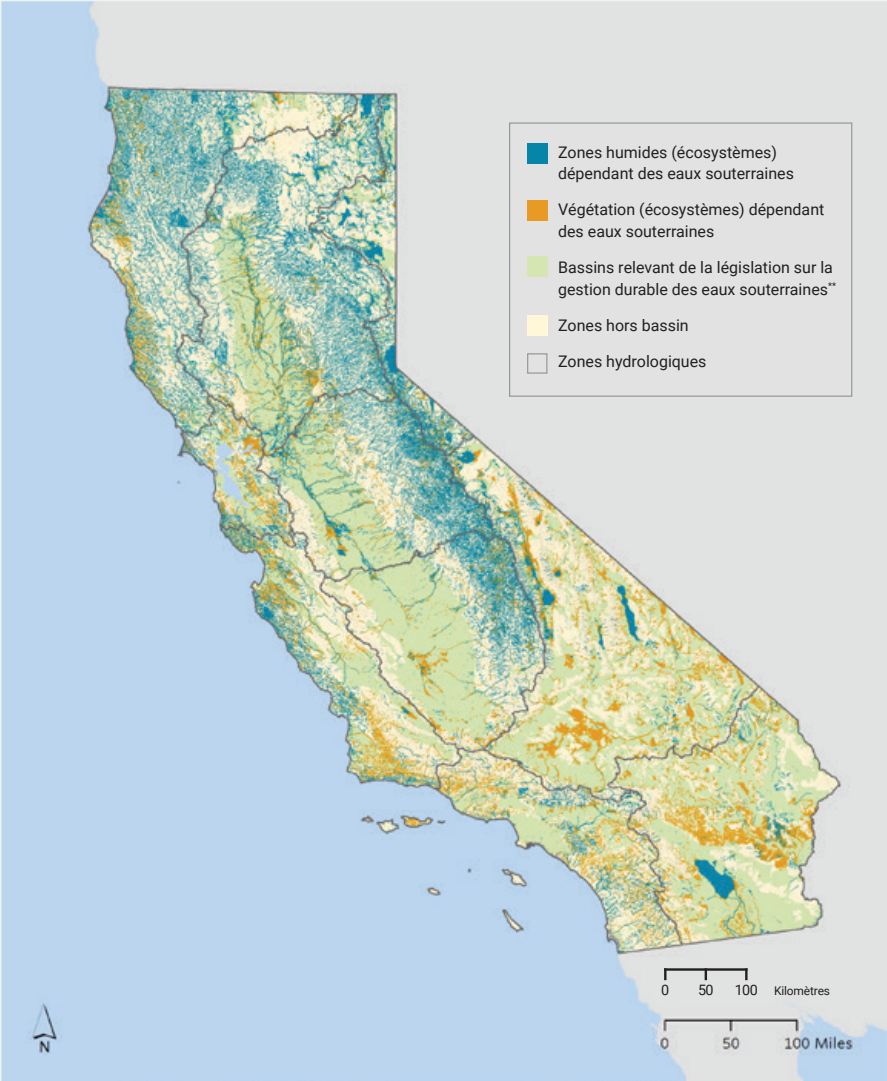


Sources : a), b) et c) basés sur Maven's Notebook (2015) ; d) basé sur Villholth et Ross (n.d.).

Encadré 6.1 Cartographie des écosystèmes dépendant des eaux souterraines en Californie (États-Unis)

La cartographie des écosystèmes dépendant des eaux souterraines (GDE) constitue la première étape vers leur gestion. À ce jour, la cartographie des GDE se déroule principalement à l'échelle locale, nécessitant l'intervention d'experts sur une longue durée ainsi que des études de terrain approfondies en vue de déterminer la dépendance des écosystèmes envers les nappes souterraines. En Californie, les GDE ont d'abord été cartographiés à l'aide d'une méthode d'inférence qui s'est appuyée sur les caractéristiques hydrologiques du paysage (telles que les sources, les zones humides et les fleuves alimentés par le débit de base ; Howard et Merrifield, 2010). La carte qui en a résulté a permis de définir des critères spécifiques visant à identifier quels impacts subissaient les GDE afin d'en tenir compte, en vertu de la loi sur la gestion des eaux souterraines de la Californie (Sustainable Groundwater Management Act — SGMA). Afin d'aider les organismes locaux à identifier les GDE au sein de leurs bassins, la carte a été affinée en utilisant la cartographie de la végétation à partir de photographies aériennes (Klausmeyer et al., 2018) ainsi qu'un ensemble de données spatiales disponibles en ligne. Grâce à la télédétection et aux analyses spatiales utilisant des systèmes d'information géographique, il est désormais possible de cartographier les GDE à des échelles plus grandes (Eamus et al., 2015). À l'échelle mondiale, les efforts de cartographie des GDE sont coordonnés par l'organisation The Nature Conservancy, qui se sert de Google Earth Engine pour traiter d'immenses quantités de données mondiales obtenues grâce à la télédétection et à l'analyse de l'utilisation des sols et du climat. Les résultats de ces travaux seront publiés en 2022.

Cartographie des écosystèmes dépendant des eaux souterraines en Californie.



Source : réalisé par les auteurs à partir de la base de données NCCAG (Klausmeyer et al., n.d.).

* *gis.water.ca.gov/app/NCDatasetViewer/.*

** *Les bassins relévant de la législation sur la gestion durable des eaux souterraines sont des bassins hautement prioritaires dans le cadre de la loi sur la gestion des eaux souterraines de la Californie (SGMA).*

Les écosystèmes dépendant des eaux souterraines ont été cartographiés dans certaines juridictions, comme la Californie (EU, encadré 6.1) et l'Australie (Doody et al., 2017). La cartographie joue, en effet, un rôle essentiel en écohydrogéologie, une discipline émergente qui vise à compléter les connaissances manquantes entre hydrologie, hydrogéologie et écologie (Cantonati et al., 2020) en utilisant un large éventail de méthodes (Eamus et al., 2015 ; Secrétariat de la Convention de Ramsar, 2013 ; Kalbus et al., 2006, Murray et al., 2003).

6.2 Omniprésence des écosystèmes dépendant des eaux souterraines

Les écosystèmes aquatiques dépendant des eaux souterraines se retrouvent dans divers types de paysages, allant des vallées de haute montagne jusqu'au fond des océans, voire même dans les déserts. Les sources d'eau constituent probablement les écosystèmes dépendant des eaux souterraines les plus évidents. Ce sont des écosystèmes endémiques et abondants, très différents les uns des autres et que l'on trouve sur plus de 2,5 millions de sites, notamment au niveau des grottes, des oasis, des cascades, des geysers et des suintements (Cantonati et al., 2020). Bien que de petite taille, les habitats au niveau des sources présentent une biodiversité exceptionnelle. Une étude menée dans le nord de l'Arizona (États-Unis) a pu établir que 20 % de la flore d'une forêt entière se développait au niveau de sources qui représentaient pourtant moins de 0,001 % du paysage (Kreamer et al., 2015). Même si elles s'apparentent à des sources, les oasis n'ont pas reçu l'attention qu'elles méritent dans les recherches portant sur les écosystèmes dépendant des eaux souterraines en dépit de leur présence à l'échelle mondiale (*L'Atlas des Oasis sahariennes et arabiques* recense 774 oasis et la Liste de Ramsar des zones humides d'importance internationale répertorie 225 sources d'eau douce et oasis).

Les écosystèmes aquatiques dépendant des eaux souterraines se retrouvent dans divers types de paysages, allant des vallées de haute montagne jusqu'au fond des océans, voire même dans les déserts

Le fonctionnement écologique d'un grand nombre de zones humides, de lacs, de fleuves et d'autres plans d'eaux de surface dépend des interactions complexes entre les eaux souterraines et les eaux de surface, qui peuvent évoluer au fil des saisons ou des années, ainsi que de leur positionnement à travers une zone humide, un lac ou un fleuve (Swanson et al., 2021 ; Kreamer et Springer, 2008). Le présent rapport fait sienne la définition des zones humides donnée par l'article 1.1 de la Convention de Ramsar, à savoir : « des étendues de marais, de fagnes, de tourbières ou d'eaux naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, où l'eau est stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée, y compris des étendues d'eau marine dont la profondeur à marée basse n'excède pas six mètres » (Secrétariat de la Convention de Ramsar, 2013).

Les écoulements des nappes souterraines alimentent les débits de base des cours d'eau et des fleuves, une source d'eau cruciale qui détermine les risques d'assèchement de ceux-ci en période de sécheresse (Boulton et Hancock, 2006 ; Larned et al., 2010). Dans certaines régions humides, le débit de base peut ainsi fournir près de la totalité du débit d'un cours d'eau (Beck et al., 2013) (figure 6.3). En revanche, sa contribution peut s'avérer insignifiante dans de nombreuses régions arides. Dans ces environnements, il arrive que la recharge des nappes souterraines soit alimentée par des réseaux de cours d'eau intermittents (Cuthbert et al., 2016). Les aquifères perchés jouent parfois un rôle important pour les écosystèmes des eaux de surface dans la mesure où le niveau des nappes souterraines tend à baisser principalement en raison de l'évaporation, et non de l'infiltration vers le bas. À titre d'exemple, on peut citer les bassins de cours d'eau intermittents, susceptibles de conserver une certaine biodiversité pendant les périodes d'étiage en vertu de la survie que permettent ces plans d'eau isolés (Bonada et al., 2020).

Les écoulements d'eaux souterraines dans les environnements marins sont un phénomène omniprésent le long des côtes (Luijendijk et al., 2020), qui crée des écosystèmes uniques dans lesquels l'eau salée et l'eau douce se mélangent (Lecher et Mackey, 2018) et peut se révéler une source substantielle de nutriments pour les eaux des estuaires et celles proches des côtes. On risque alors de voir se développer une eutrophisation et une hypoxie, surtout lorsque les bassins versants situés en amont sont lourdement sollicités par l'agriculture intensive et l'urbanisation (Santos et al., 2021 ; Hosono et al., 2012). Les forts taux de salinité des

environnements terrestres côtiers que sont les *sebkha*[19] sont principalement entretenus par les eaux souterraines, qui apportent des solutés qui demeurent présents après l'évaporation de l'eau et créent ces biomes particuliers (Yechieli et Wood, 2002). Dans les eaux à forte salinité comme celles de la mer Morte, l'entrée d'eaux souterraines assure la survie des écosystèmes locaux qui, autrement, ne pourraient pas tolérer cette salinité (Ionescu et al., 2012). De même, on trouve fréquemment des zones humides précieuses, à l'écologie délicate, en bordure des salines de bon nombre de régions continentales désertiques (Marazuela et al., 2019).

Les écosystèmes terrestres dépendent des eaux souterraines dans les paysages naturels et entretenus de tous les biomes anthropiques du monde (Ellis et Ramankutty, 2008) où les plantes peuvent accéder à celles-ci (Fan et al., 2017 ; figure 6.2a). L'impact des différents couverts forestiers sur l'infiltration et la recharge des nappes souterraines fait débat (Ellison et al., 2017). Même les effets de la sylviculture sur la recharge des nappes souterraines et les flux de basse saison présentent des variations étant donné que ces effets varient selon les régions et les climats ainsi qu'en fonction des étapes du cycle forestier (Reynolds et Thompson, 1988). Jusqu'à présent, l'impact de la végétation a fait l'objet de peu d'études approfondies et n'a pas non plus été intégré dans la gestion de la recharge des nappes souterraines. Au Sahel, on a constaté une hausse du niveau des nappes souterraines au fil des décennies, sous l'effet des changements de la végétation, qui est passée d'une végétation naturelle à racines profondes à des cultures peu profondes qui consomment moins d'eau (Favreau et al., 2009). Dans les milieux arides, les points d'eau sont souvent alimentés exclusivement par les eaux souterraines, qui sont donc essentielles au maintien des réseaux alimentaires complexes des paysages arides telles les savanes. Les points d'eau creusés par la faune sauvage peuvent revêtir une importance vitale et illustrent les liens complexes entre les eaux souterraines, le maintien des écosystèmes et la biodiversité (Lundgren et al., 2021). Dans les biomes de cultures et de pâturages, les eaux souterraines participent à l'écologie des paysages entretenus et naturels, même si ces paysages sont généralement considérés d'un point de vue agricole plutôt qu'écologique. Enfin, de manière générale, les zones ripicoles, les zones humides et les autres masses d'eau de surface dépendent souvent des eaux souterraines et peuvent fournir des services écosystémiques essentiels. Par exemple, dans les régions plus humides, les forêts ripicoles et les zones humides peuvent purifier les eaux de ruissellement et de drainage des activités agricoles et d'élevage trop chargées en azote (Bahn et An, 2020), réduisant ainsi la charge en nutriments dans les GDE. À l'inverse, dans les régions plus arides, les inondations saisonnières peuvent améliorer la recharge des nappes souterraines dans les plaines d'inondation tandis que la sédimentation peut fournir des apports essentiels de matières nutritives et améliorer les sols en les modifiant (Talbot et al., 2018).

Les interactions entre les eaux souterraines et les écosystèmes jouent un rôle de plus en plus important au sein des principaux écosystèmes d'eau douce du monde

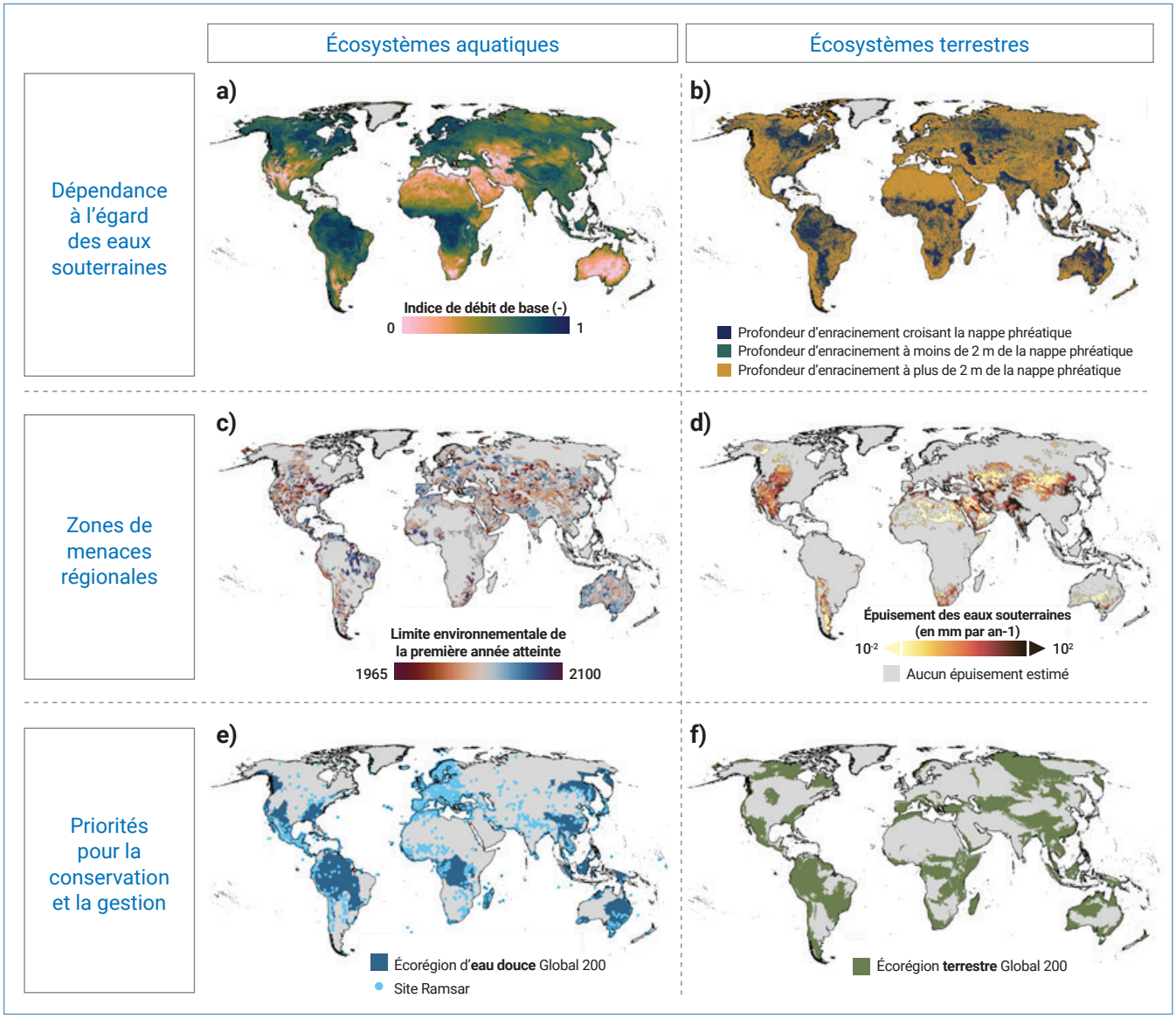
Bien que très répandus, les écosystèmes souterrains restent souvent mal compris. On trouve des organismes et des microorganismes dans des quantités et des proportions variables dans tous les aquifères (Humphreys, 2006, Danielopol et al., 2003). Ces écosystèmes souterrains contribuent souvent à la purification de l'eau et influent sur la capacité de stockage des aquifères qu'ils peuvent, dans certains cas, augmenter par bioturbation et en consommant les biofilms et, dans d'autres cas, diminuer en en obstruant les interstices. Dans de nombreux endroits, l'emploi des sols détermine, en grande partie, l'abondance, la composition et la structure communautaire des invertébrés qui peuplent les eaux souterraines ; Tione et al. (2016) en donnent un exemple en Argentine. Compte tenu de la sensibilité des écosystèmes souterrains aux changements de qualité des eaux souterraines, le suivi de l'abondance et d'autres bio-indicateurs au sein de ces écosystèmes peut ouvrir la voie à des approches alternatives et utiles pour évaluer celle-ci (Griebler et Avramov, 2015).

Les interactions entre les eaux souterraines et les écosystèmes jouent un rôle de plus en plus important au sein des principaux écosystèmes d'eau douce du monde, tels que ceux qui figurent sur la liste des écorégions d'eau douce prioritaires pour la conservation (Olsson et al., 2002 ; figure 6.3e), notamment certains fleuves de l'est de l'Australie, l'Indus, le fleuve

[19] Une vasière ou une sablière côtière supralittorale dans laquelle s'accumulent des minéraux évaporitiques salins en raison d'un climat semi-aride à aride.

Congo, l'Amazone, le fleuve Colorado et d'autres zones humides remarquables comme le delta de l'Okavango en Afrique australe, le marais du Sudd au Soudan du Sud, le Delta intérieur du Niger au Sahel et le Pantanal en Amérique du Sud. Ces régions forment non seulement un habitat favorable à des niveaux de biodiversité significatifs à l'échelle mondiale, mais elles sont également essentielles à des processus plus vastes du système terrestre comme le cycle des matières nutritives, la séquestration du carbone et les processus atmosphériques (Erwin, 2009). Le fait qu'un grand nombre de ces régions connaissent régulièrement des sécheresses (région Est de l'Australie), souffrent d'un épuisement continu des nappes souterraines (l'Indus, le Colorado) ou connaîtront un stockage d'eau souterraine de plus en plus variable ou anormal du fait du changement climatique (delta de l'Okavango ; Hughes et al., 2011) témoigne de l'ampleur et de la gravité des conséquences que peuvent avoir les menaces pesant sur tous les écosystèmes dépendant des eaux souterraines (section 6.3).

Figure 6.3 Répartition mondiale de la dépendance à l'égard des eaux souterraines, zones de menaces régionales et priorités pour la conservation et la gestion des écosystèmes aquatiques et terrestres



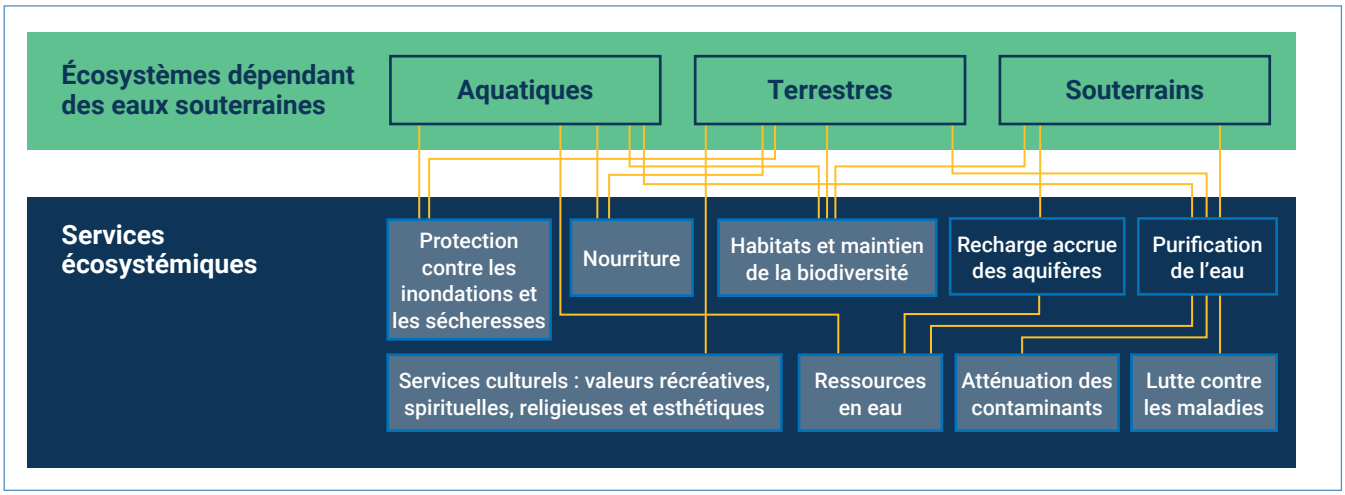
Note : a) indice de débit de base, représentant la contribution relative des eaux souterraines et d'autres sources différées au débit des cours d'eau ; b) relation entre la profondeur de la surface de la nappe souterraine à l'état d'équilibre et la profondeur maximale d'enracinement ; c) estimation de l'année où la limite du flux environnemental sera atteinte (section 6.4) ; d) taux d'épuisement des nappes souterraines ; e) sites Ramsar identifiant les zones humides d'importance internationale et les écorégions d'eau douce Global 200 ; f) écorégions terrestres Global 200. Les écorégions Global 200 constituent un ensemble prioritaire de 238 écorégions (53 écorégions terrestres, 142 écorégions d'eau douce et 43 écorégions marines — non incluses ici) mis au point pour protéger les régions à la biodiversité exceptionnelle et les écosystèmes représentatifs.

Sources : auteurs du rapport à partir des données de a) Beck et al. (2013) ; b) Fan et al. (2013, 2017) ; c) De Graaf et al. (2019) ; d) Wada et al. (2010) ; e) service d'information des Sites Ramsar (n.d.) et Olson et Dinerstein (2002) ; f) Olson et Dinerstein (2002).

6.3 Les services écosystémiques des eaux souterraines et les menaces pesant sur eux

Les services écosystémiques se définissent comme les bénéfices multiples et divers que l'environnement naturel procure aux êtres humains (IPBES, 2019). Les écosystèmes dépendant des eaux souterraines assurent des services écosystémiques fondamentaux (figures 6.2 et 6.4). Chaque type de GDE assure un certain nombre de services écosystémiques (figure 6.2) parmi les différentes catégories de services (soutien, approvisionnement, régulation et services culturels ; voir section 1.5). Ainsi, les GDE aquatiques et terrestres fournissent des habitats, favorisent la biodiversité, régulent les inondations et les sécheresses, procurent une source de nourriture tout comme ils offrent des services culturels, y compris récréatifs, spirituels et esthétiques. Tout au long de l'histoire de l'humanité, les sources d'eau ont été des inspirations artistiques et musicales, des objets et des instruments stratégiques dans les conflits et les guerres tout comme des lieux privilégiés destinés aux cérémonies et aux cultes religieux (Kreamer et al., 2015). De fait, les croyances de nombreuses cultures autochtones attribuent aux sources, aux zones humides et aux écosystèmes qui leur sont associés une valeur intrinsèque qui va au-delà des services qu'ils rendent aux personnes (ONU, 2021). Les écosystèmes souterrains fournissent également des services écosystémiques essentiels tels que le stockage et la fourniture de ressources en eau, l'atténuation des contaminants et la mitigation des maladies (Griebler et Avramov, 2015). L'ensemble de ces services sont parfois appelés services écosystémiques liés aux eaux souterraines (Manzano et Lambán, 2011). Les GDE et les services écosystémiques, qui sont liés à la végétation et aux sols dans les zones non saturées, jouent des rôles critiques dans la protection des aquifères contre la pollution en procurant une barrière physique, en favorisant les processus biophysiques comme la filtration, la biodégradation et la sorption des contaminants ainsi qu'en facilitant et en protégeant la recharge naturelle (WLE GCRAI, 2015).

Figure 6.4 Relations entre les différents types d'écosystèmes dépendant des eaux souterraines et les services écosystémiques qu'ils fournissent



Source : les auteurs du chapitre.

De manière générale, les écosystèmes dépendant des eaux souterraines comme les services écosystémiques sont sous-représentés au sein des objectifs de développement durable (ODD) de l'ONU. L'importance des eaux souterraines n'est que peu reconnue et reflétée au niveau des cibles des ODD, une situation encore aggravée par le manque de données mondiales fiables, actualisées et applicables aux ODD relatifs aux eaux souterraines ainsi que par le manque de clarté sur les rapports essentiels qui existent entre les aquifères et les ODD (Guppy et al., 2018). Pourtant, le rôle des eaux souterraines au sein des écosystèmes aquatiques possède un lien avec la cible 6.4 (utilisation des ressources en eau et pénurie) et la cible 6.6 (écosystèmes liés à l'eau). La cible 6.4, la seule cible des ODD qui, à l'heure actuelle, rend opérante les eaux souterraines et les services écosystémiques, intègre les flux environnementaux dans l'indicateur 6.4.2 relatif au « niveau de stress hydrique ». Elle est assortie d'une méthodologie et d'un programme en ligne permettant de calculer le niveau viable des extractions d'eaux souterraines, selon des principes d'évaluation des flux environnementaux (FAO, 2019). La cible 6.6, quant à elle, vise à surveiller les évolutions des écosystèmes liés à l'eau, notamment les zones humides végétalisées, les rivières, les lacs,

les aquifères et les nappes souterraines (Dickens et al., 2017). Mais à ce jour, la collecte de données s'est toutefois focalisée sur l'étendue spatiale des eaux libres sans beaucoup d'intérêt pour les eaux souterraines, ni pour l'identification ou à la cartographie des GDE — un défaut majeur de la méthodologie des ODD.

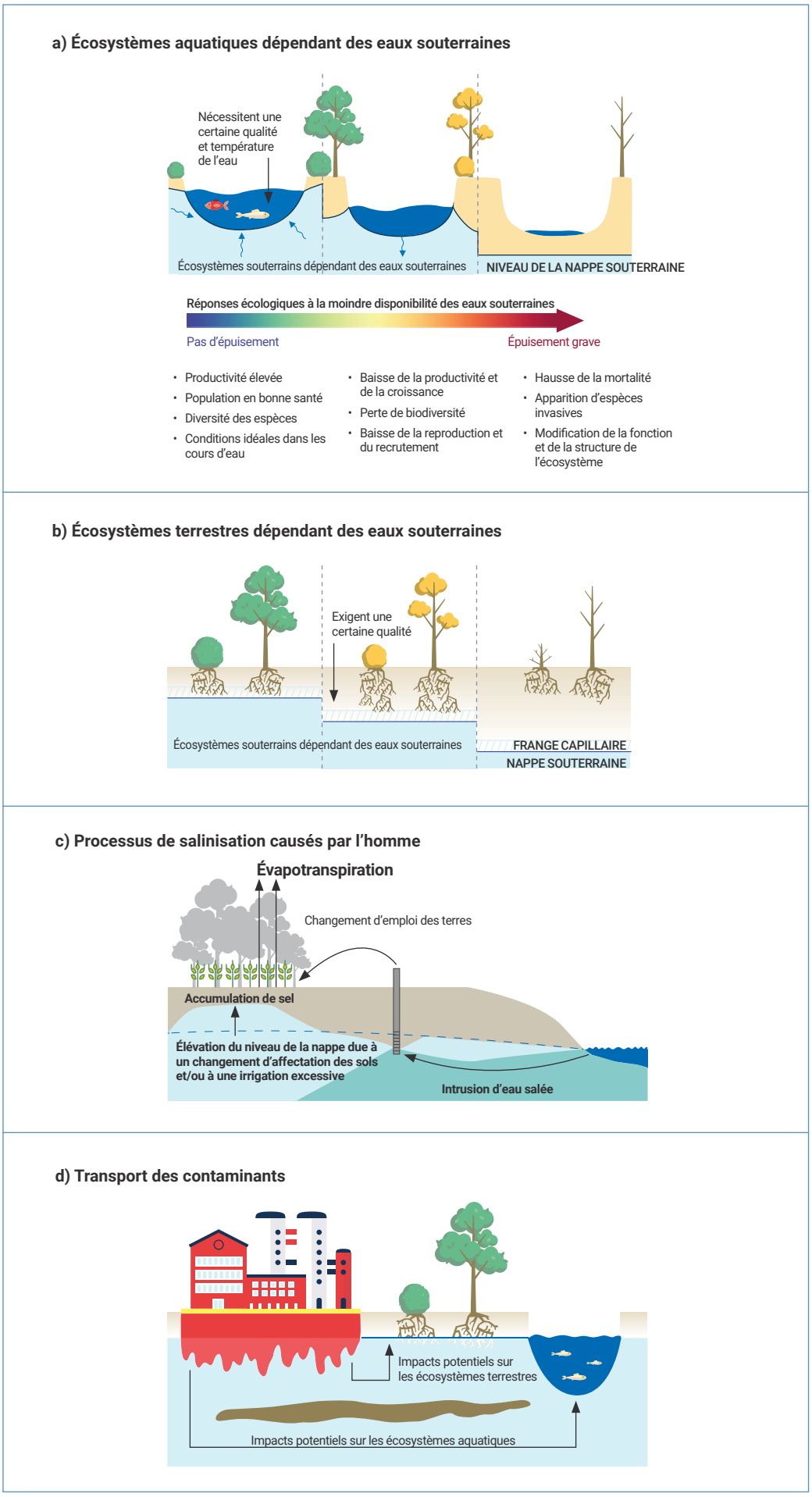
Les écosystèmes dépendant des eaux souterraines et les services écosystémiques qui y sont associés sont menacés par l'épuisement des nappes souterraines, le changement climatique et les modifications d'emploi des sols (figures 6.2, 6.3 et 6.5). L'épuisement des nappes souterraines, soit la baisse persistante des niveaux d'eau, n'est pas sans conséquences pour les écosystèmes aquatiques et terrestres (figure 6.5). Partout dans le monde, on trouve des zones menacées par l'épuisement des nappes souterraines (figure 6.3d), en particulier dans les régions pratiquant l'extraction intensive pour l'irrigation. La réduction du débit des cours d'eau, c'est-à-dire la baisse de débit causée par le pompage des eaux souterraines, suscite de vives inquiétudes pour les écosystèmes aquatiques (Gleeson et Richter, 2017). Les impacts écologiques de ce phénomène (figure 6.3c) se produisent lorsque les débits des cours d'eau sont inférieurs aux flux environnementaux (définis dans la section 6.4), ce qui devrait se produire dans environ 40 à 80 % de tous les bassins où l'on pratique le pompage des eaux souterraines d'ici le milieu du siècle (De Graaf et al., 2019).

La qualité, la température et la pollution de l'eau ont toutes un impact sur les écosystèmes dépendant des eaux souterraines et les services qu'ils fournissent

Partout dans le monde, on constate un assèchement important des sources, des zones humides et des oasis. Ce pourquoi il importe de prendre en compte les impacts du changement climatique sur les GDE (Kløve et al., 2014), d'autant plus que les nappes souterraines servent souvent de tampon lors de sécheresses — soit de manière naturelle en alimentant les cours d'eau pendant les périodes sèches, soit de manière indirecte, grâce à l'utilisation plus accrue qu'en font les humains pendant ces périodes. La dégradation de ces fonctions peut donc nuire aux personnes comme aux systèmes écologiques. Il faut enfin noter que les modifications d'emploi des sols affectent les GDE. Par exemple, la disparition des forêts sèches a entraîné une salinisation régionale en Australie (Clarke et al., 2002) comme aussi dans la région du Chaco en Argentine et au Paraguay (Giménez et al., 2016 ; Marchesini et al., 2013).

La qualité, la température et la pollution de l'eau ont toutes un impact sur les écosystèmes dépendant des eaux souterraines et les services qu'ils fournissent (figure 6.5). Bien que ce chapitre traite principalement des eaux souterraines en termes de quantité (leur volume, leur niveau, leur flux et leurs variations temporelles), leur qualité (qu'elle soit naturelle ou altérée par les activités humaines) et leur température sont tout aussi essentielles. Chaque écosystème est conditionné par des exigences spécifiques en matière de qualité de l'eau, de sorte que ce qui est approprié pour certains écosystèmes peut être préjudiciable pour d'autres. Par exemple, la salinité est nécessaire aux écosystèmes des zones humides côtières ou des déserts de sel. Toutefois, dans d'autres environnements tels les écosystèmes terrestres, une augmentation de la salinité, due à une élévation du niveau des nappes souterraines provoquée artificiellement par une modification d'emploi des sols (la déforestation en Australie par exemple) ou par une irrigation excessive (la basse vallée de l'Indus, au Pakistan, par exemple) peut entraîner une dégradation de l'habitat, une diminution de la production agricole, une érosion des sols, une altération du cycle biogéochimique et une diminution du stockage du carbone (Foster et Chilton, 2003). La contamination géogénique (c'est dire par des contaminants chimiques d'origine naturelle) affecte la santé de millions de personnes dans le monde et peut également avoir un impact sur les GDE, ce qui en soi constitue un problème insuffisamment traité (Bretzler et Johnson, 2015). Les GDE peuvent être pollués par des contaminants organiques connus et émergents (les pesticides, les produits pharmaceutiques, les drogues récréatives, les agents de surface et les produits de soin personnels) ainsi que par des nutriments issus des eaux usées domestiques et urbaines ainsi que de l'agriculture. Ces contaminants organiques et leurs produits de dégradation peuvent être à l'origine de problèmes de santé, notamment des effets délétères sur le développement et la capacité de reproduction chez les humains, au sein de la faune et des écosystèmes (Campbell et al., 2006). Jusqu'à présent, les études concernant l'impact des contaminations sur les écosystèmes ont surtout porté sur les eaux de surface. On en sait beaucoup moins sur les écosystèmes touchés par la contamination des nappes souterraines.

Figure 6.5
Impacts écologiques de la diminution de qualité et de quantité des nappes souterraines



Note : a) et b) réponses écologiques à la moindre disponibilité des eaux souterraines : a) écosystèmes aquatiques dépendant des eaux souterraines et b) écosystèmes terrestres dépendant des eaux souterraines ; c) et d) impacts de la qualité de l'eau et de la contamination sur les écosystèmes dépendant des eaux souterraines : c) processus de salinisation des sols et des eaux souterraines dus à la modification d'emploi des sols, au pompage côtier et à l'irrigation et d) impacts locaux et régionaux d'accidents de pollution dus aux systèmes régionaux d'écoulement des eaux souterraines.

Sources : a) et b) basé sur Rohde et al. (2017, fig. 2, p. 297) ; c) basé sur Foster et Chilton (2003, fig. 8, p. 1965) ; d) auteurs du rapport.

6.4 Gestion conjointe de l'eau et des terres, solutions fondées sur la nature et protection des écosystèmes

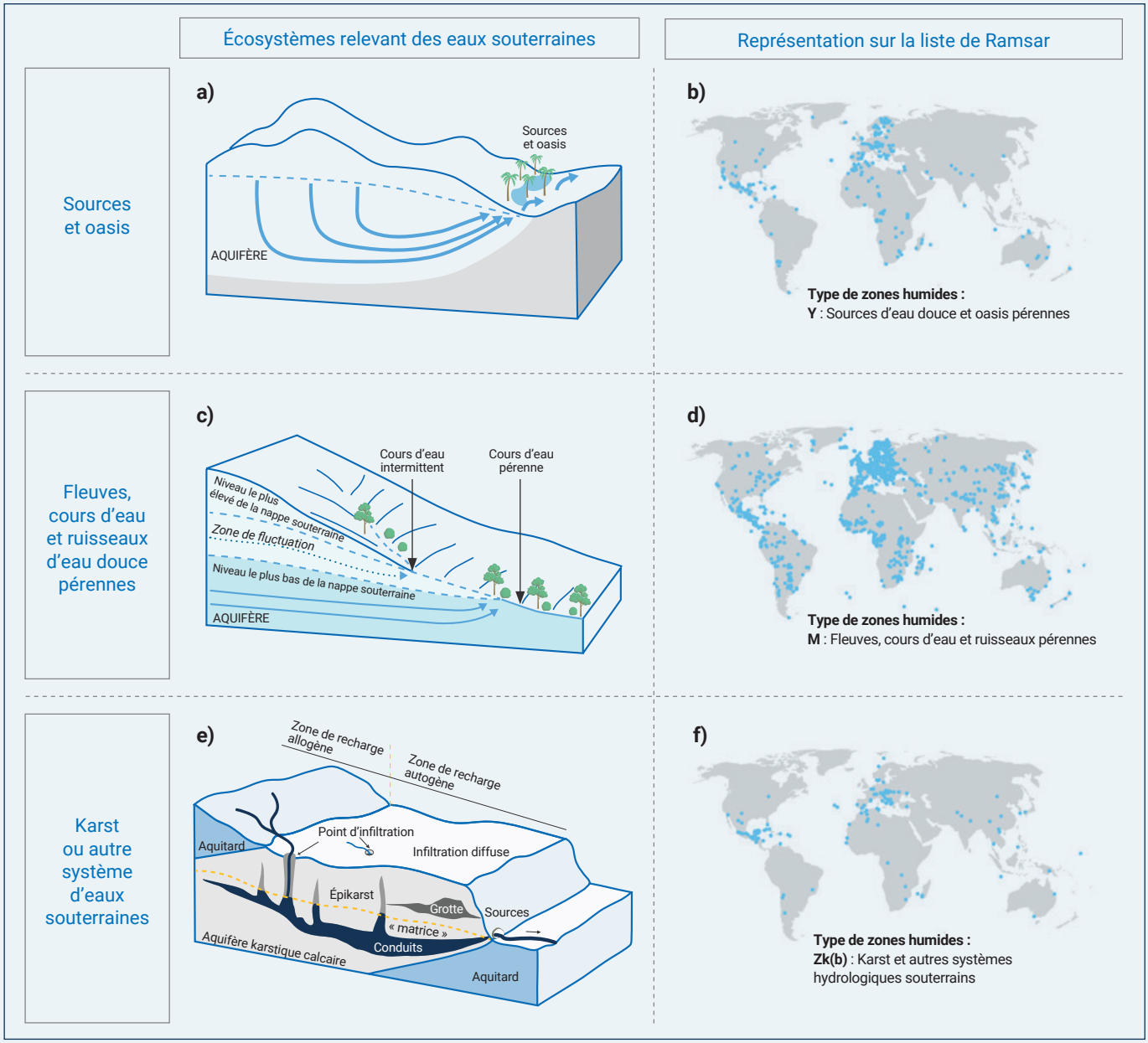
Grâce à la gestion des eaux souterraines, la gestion conjointe de l'eau et des terres, les solutions fondées sur la nature (WWAP/ONU-Eau, 2018) et une meilleure protection des écosystèmes, la bonne santé commune des nappes souterraines, des écosystèmes et des humains peut être améliorée. La gestion des eaux souterraines, telle que décrite au chapitre 11, se limite souvent aux nappes souterraines ou aux aquifères. Bien qu'importante, cette approche ne suffit pas à garantir que les nappes souterraines et les écosystèmes fournissent de concert des services écosystémiques essentiels. À l'inverse, les connaissances sur les nappes souterraines de même que la gestion de ces dernières ne sont souvent pas assez intégrées à la protection et à la gestion des écosystèmes. Bien que le déversement et le débit de base des nappes souterraines soient les garants de la bonne santé de nombreux écosystèmes aquatiques, la dépendance de ces écosystèmes à l'égard des eaux souterraines n'est souvent pas prise en compte dans la cartographie des habitats d'eau douce ou de la biodiversité (McManamay et al., 2017). Par exemple, la liste Global 200 des écorégions (terrestres, d'eau douce et marines) de la World Wildlife Foundation ne prend pas en compte directement, ou explicitement, les nappes souterraines et ne cartographie pas les GDE (encadré 6.1) lorsqu'elle met en évidence les zones clés pour la protection des écosystèmes aquatiques et terrestres (Olson et Dinerstein, 2002). Prendre en compte de façon explicite les eaux souterraines au niveau de la gestion conjointe de l'eau et des terres, des solutions fondées sur la nature et de la protection des écosystèmes représenterait un premier pas concret pour contribuer à la viabilité des nappes souterraines et des écosystèmes.

Encadré 6.2 Les nappes souterraines, les zones humides d'importance internationale (sites Ramsar) et les sites désignés par l'UNESCO tels les sites du patrimoine mondial, les réserves de biosphère et les géoparcs

Les nappes souterraines sont sous-représentées au sein des réseaux mondiaux de conservation tels la Liste de Ramsar des zones humides d'importance internationale (Secrétariat de la Convention de Ramsar, 2013) et les sites désignés par l'UNESCO (sites du patrimoine mondial, réserves de biosphère et géoparcs). La Liste de Ramsar répertorie les zones humides (sites Ramsar) qui revêtent de l'importance « pour l'humanité dans son ensemble » en fonction de critères de rareté des sites, de diversité biologique et de communautés écologiques. Cette liste (voir figure) désigne les différents processus relatifs aux nappes souterraines ou à leurs expressions de surface comme « sources d'eau douce permanentes ; oasis » et « systèmes karstiques et autres systèmes hydrologiques souterrains » ainsi que les environnements dépendant des eaux souterraines comme des « rivières/cours d'eau/ruisseaux permanents ». Les parties à la Convention de Ramsar sont individuellement responsables de la désignation des sites ainsi que de l'utilisation rationnelle et de la gestion des zones humides transfrontalières. Cependant, la Convention ne prévoit aucune évaluation systématique du rôle de soutien des nappes souterraines à travers le réseau mondial des sites Ramsar, ni du rôle de ces sites dans la conservation des ressources en eaux souterraines.

Les sites désignés par l'UNESCO constituent un espace d'expérimentation et d'exemplarité en matière de développement durable. Parallèlement aux sites Ramsar, les sites désignés par l'UNESCO sont essentiels à la réalisation des cibles de l'ensemble des objectifs de développement durable (ODD). À elles seules, les zones humides mondiales, dont celles classées sites Ramsar, contribuent à 75 indicateurs des ODD (Secrétariat de la Convention de Ramsar, 2018). On compte actuellement plus de 130 sites Ramsar qui se confondent totalement ou partiellement avec plus de cent zones humides du patrimoine mondial. Citons l'exemple emblématique du delta de l'Okavango classé comme site du patrimoine mondial (le système du delta de l'Okavango est un site Ramsar) au Botswana. Il s'agit d'une vaste zone humide continentale alimentée par les crues et formant une mosaïque d'écoulements d'eau, de plaines inondables et d'îles (figure 6.1). Les nappes souterraines situées sous ces îles font office de piégeage pour les minéraux dissous suite au « pompage de l'eau » par les arbres et la végétation insulaires, qui la diffuse ensuite par évapotranspiration, ce qui empêche la salinisation de ce système hydrique pratiquement fermé et où domine l'évaporation. Ce processus permet aux eaux de surface du delta de rester douces, fournissant ainsi une source d'eau pour la faune et la flore sauvages ainsi que pour les populations locales en plein milieu du désert aride du Kalahari (UNESCO, n.d.). En dépit de leur rôle essentiel d'appui à la résilience de plusieurs écosystèmes, il n'existe aucune étude complète sur la dépendance envers les nappes souterraines ou sur les interactions avec celles-ci dans les sites désignés par l'UNESCO. La Convention de Ramsar et les sites désignés par l'UNESCO peuvent être complémentaires et se renforcer mutuellement pour garantir que les processus des écosystèmes et les valeurs culturelles sont pleinement pris en compte dans la protection et la gestion des sites désignés.

Représentation des écosystèmes dépendant des eaux souterraines dans la Liste de Ramsar des zones humides d'importance internationale



Sources : a) et c) basés sur Foster et al. (2006, fig. 1, p. 2) ; b), d) et f) auteurs du rapport à partir des données du SISR (n.d.) ; e) basé sur Goldscheider et Drew (2007, fig. 1.1, p. 3).

Les eaux souterraines participent à la fois au cycle de l'eau et d'écosystèmes aquatiques, terrestres et souterrains complexes. Il est donc essentiel d'intégrer la gestion des nappes souterraines à la planification et à la protection des écosystèmes et des bassins versants, comme cela se fait actuellement à différentes échelles — infranationale (en Californie par exemple), nationale (en Afrique du Sud ou en Australie) ou supranationale (au sein de l'Union européenne par exemple) (Rohde et al., 2017). Les plans d'aménagement du territoire, qui permettent une meilleure prise en compte des nappes souterraines, comportent en général deux éléments : i) le maintien de la quantité des ressources et la protection qualitative en fonction de la vulnérabilité du système d'eaux souterraines (ou de l'aquifère) à l'épuisement, à l'affaissement, à la dégradation ou à la pollution ; ii) la protection des sources autour des sites individuels d'extraction d'eau souterraine tels que les forages ou les points d'eau, en accordant une attention particulière à la protection contre la pollution (Smith et al., 2016).

Encadré 6.3 Des solutions fondées sur la nature pour protéger les écosystèmes dépendant des eaux souterraines

Les solutions fondées sur la nature peuvent contribuer, de façon efficace, à la gestion, la protection et la réhabilitation des écosystèmes dépendant des eaux souterraines (GDE) en réduisant les impacts anthropiques (emploi des sols, changements climatiques, extractions d'eaux souterraines, charges en matières nutritives dues aux pratiques agricoles, pollution ponctuelle et diffuse). On trouvera ci-dessous deux exemples visant à illustrer la diversité des solutions fondées sur la nature et leurs impacts sur les GDE.

Des solutions fondées sur la nature ont été conçues et mises en œuvre dans la zone de bassin versant du réservoir de Sulejów (en Pologne), une zone caractérisée par des efflorescences cyanobactériennes dues à une forte contamination des eaux souterraines par les nitrates et le phosphore provenant d'une pollution diffuse. L'aménagement d'une couche souterraine de sciure de pin mélangée à de la terre ou du calcaire a permis de réduire les concentrations de phosphates et de nitrates dans les eaux souterraines de 58 % et 85 % respectivement (Izydorczyk et al., 2013 ; Frątczak et al., 2019).

On trouve un autre exemple d'infrastructure naturelle basée sur les eaux souterraines dans les zones rurales côtières du Bangladesh. Là, des dispositifs locaux de collecte des eaux de pluie et de stockage des eaux souterraines soigneusement conçus contribuent à la sécurité et à la résilience hydriques dans des zones perturbées par la salinité et l'arsenic naturellement présent dans les eaux souterraines (Ahmed et al., 2018). Grâce à des puits et filtres simples, ces dispositifs collectent les précipitations saisonnières souvent entraînées par ruissellement de surface vers la mer et permettent qu'elles soient disponibles tout au long de l'année. En outre, du fait de la densité des eaux souterraines salines, l'eau douce qui s'y est infiltrée a tendance à rester plus près de la surface sans se mélanger. Chaque dispositif dessert de petites communautés où vivent jusqu'à plusieurs centaines de personnes, lesquelles sont capables, après avoir reçu une formation, d'entretenir le système elles-mêmes. Ces systèmes ont été déployés dans une centaine de communautés au Bangladesh et présentent un fort potentiel pour les régions exposées à la fois aux inondations et aux pénuries d'eau.

Les solutions fondées sur la nature relatives aux eaux souterraines (parfois aussi appelées « infrastructures naturelles fondées sur les eaux souterraines ») assurent l'exploitation et la gestion des nappes souterraines comme les systèmes et les processus des sous-sols dans le but explicite d'améliorer le stockage de l'eau, la rétention des crues, la qualité de l'eau ainsi que les fonctions ou services environnementaux dans l'intérêt d'accroitre la sécurité de l'eau, la résilience humaine et la viabilité de l'environnement (Villholth et Ross, n.d.). La gestion de la recharge des aquifères (voir l'encadré 7.1 et la section 11.5), de plus en plus mise en œuvre, constitue la solution fondée sur la nature relative aux eaux souterraines la plus éprouvée (Dillon et al., 2019). Il existe d'autres solutions allant des infrastructures grises (conçues par l'humain) à l'infrastructure verte (plus naturelle), notamment l'agriculture respectueuse de l'environnement, les bassins d'infiltration, la récolte des eaux de ruissellement, la filtration au niveau des rives et la bioremédiation *in-situ* des eaux souterraines. Ainsi de nombreuses villes (dites « villes-éponges ») ont mis en place des infrastructures vertes afin d'améliorer la disponibilité et la qualité de l'eau (Harris, 2015), mais la qualité et les impacts potentiels de l'eau qui s'infiltre dans les aquifères urbains sont mal connus et mal compris (encadré 6.3).

Enfin, les GDE ne sont pas généralement protégés de manière directe ou officielle. En effet, peu de mesures ont été adoptées pour protéger les GDE, en particulier les GDE terrestres et souterrains (Kreamer et al., 2015). Ce constat comporte toutefois une exception notable : la Convention de Ramsar (encadré 6.2), qui a élaboré un cadre de gestion des nappes souterraines en sept étapes afin de préserver les aspects écologiques des zones humides d'importance internationale (Secrétariat de la Convention de Ramsar, 2010).

Nombre de ces zones étant transfrontalières, leur gestion nécessite, pour leur protection et leur développement à long terme, une coopération internationale, qui mette clairement l'accent sur les nappes souterraines et les aquifères partagés (voir chapitre 12). S'agissant des écosystèmes aquatiques, il existe un autre outil largement utilisé pour les protéger : la surveillance des flux environnementaux, soit la quantité, la périodicité et la qualité des débits et des niveaux d'eau douce nécessaires à la survie des écosystèmes aquatiques qui, en retour, alimentent les cultures, les économies, les moyens de subsistance durables et le bien-être des humains (Arthington et al., 2018). Par exemple, la Directive-cadre sur l'eau (DCE) de l'Union européenne établit des seuils de disponibilité et de qualité des eaux des nappes souterraines au sein des GDE (Parlement européen/Conseil de l'Union européenne, 2000). Dans ce cas, les flux environnementaux minimaux ne doivent pas être considérés comme des « demandes écologiques » mais comme des « restrictions aux divers usages » (à la fois des GDE et des nappes souterraines proches) afin que les flux environnementaux n'entrent pas en concurrence avec d'autres demandes en eau pour la consommation humaine. On recense de nombreuses méthodes de calcul des flux environnementaux, mais peu d'entre elles évaluent ou quantifient explicitement la contribution des eaux souterraines aux flux environnementaux (FAO, 2019 ; Gleeson et Richter, 2017). Pour finir, il importe de mieux comprendre les aspects qualitatifs des flux environnementaux associés aux nappes souterraines.

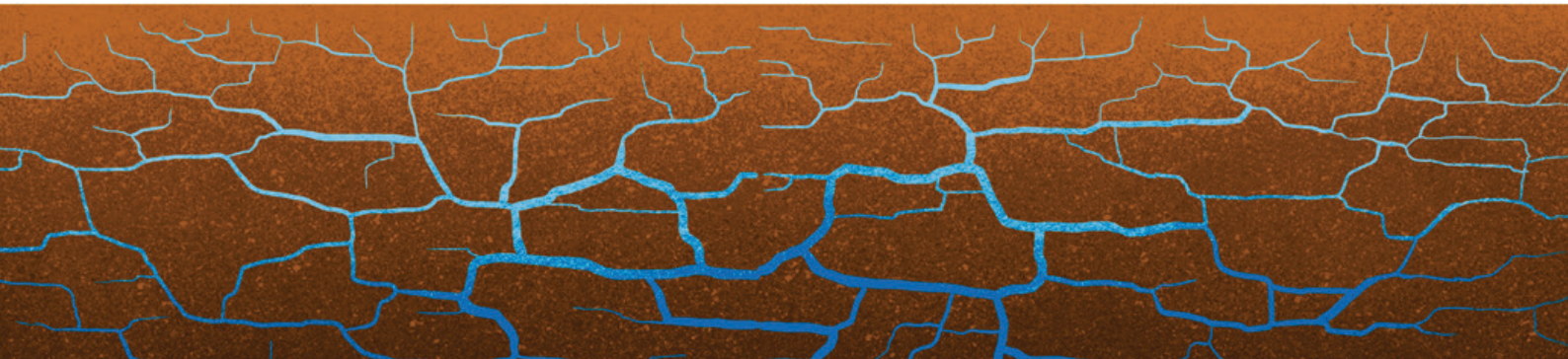
Chapitre 7

Eaux souterraines, aquifères et changement climatique

UNESCO-PHI
Richard Taylor and Alice Aureli

AIH
Diana Allen, David Banks, Karen Villholth et Tibor Stigter

Avec les contributions de Mohammad Shamsudduha (UCL-IRDR), Maxine Akhurst (BGS), Niels Hartog (KWR), Harmen Mijnlieff et Rory Dalman (TNO), Bridget Scanlon (Université du Texas à Austin), Timothy Green (USDA), Yuliya Vystavna (AIEA), Tommaso Abrate (OMM), Pedro Arrojo-Agudo (Rapporteur spécial sur les droits de l'homme à l'eau potable et à l'assainissement), Tatiana Dmitrieva et Mahmoud Radwan (UNESCO-PHI), Guillaume Baggio Ferla (UNU-INWEH), Ziad Khayat (CESAO), Eva Mach (OIM) et Enric Vázquez Suñé (IDAEA-CSIC)



7.1 Introduction

Le changement climatique influe considérablement sur l'approvisionnement et la demande en eau douce à l'échelle mondiale. Le réchauffement atmosphérique d'environ 1ºC enregistré à l'échelle mondiale au cours des cinquante dernières années a eu un impact direct sur l'approvisionnement en eau douce du fait de l'augmentation des précipitations extrêmes, des inondations et des sécheresses plus accentuées et fréquentes, du taux croissant d'évapotranspiration, de l'élévation du niveau des mers, des régimes de précipitation et d'eau de fonte plus instables. Les eaux souterraines, qui constituent la réserve d'eau douce la plus largement répartie sur Terre, sont naturellement bien placées pour jouer un rôle vital en permettant aux sociétés de s'adapter aux pénuries d'eau intermittentes et persistantes, causées par le changement climatique. Elles sont également essentielles pour satisfaire la demande croissante en eau afin de réaliser plusieurs des objectifs de développement durable (ODD), notamment l'objectif 2 (éliminer la faim), 6 (accès de tous à l'eau) et 13 (mesures d'urgence pour lutter contre le changement climatique). Les aquifères, qui transportent et stockent les eaux souterraines, peuvent également contribuer à l'atténuation des effets du changement climatique au travers de l'emploi d'énergie géothermique pour réduire les émissions de CO_2 ainsi que le captage et le stockage du CO_2 émis. Ce chapitre passe en revue les savoirs les plus récents sur les impacts du changement climatique sur la quantité et la qualité des nappes souterraines ainsi que les opportunités, les risques et les problèmes causés par l'exploitation des aquifères aux fins de l'adaptation et de l'atténuation du changement climatique.

7.2 Impacts du changement climatique sur les ressources en eaux souterraines

Le changement climatique influe directement sur les systèmes d'eaux souterraines du fait qu'il modifie le bilan hydrique à la surface de la Terre et, indirectement, du fait qu'il amène un changement dans les extractions d'eau souterraine lorsque les sociétés tentent de s'adapter aux fluctuations de la disponibilité de l'eau douce (figure 7.1 –- Taylor et al., 2013a ; Lall et al., 2020). Les impacts du changement climatique sur les bilans hydriques terrestres peuvent également dépendre de l'activité humaine, notamment des transformations de l'occupation des sols et du couvert végétal (LULC) (Favreau et al., 2009 ; Amanambu et al., 2020). Le réchauffement de la planète provoque aussi la libération d'eau douce stockée depuis longtemps dans les calottes glaciaires continentales et la dilatation thermique des océans, deux phénomènes qui contribuent considérablement à l'élévation du niveau de la mer.

7.2.1 Impacts directs du changement climatique sur les eaux souterraines

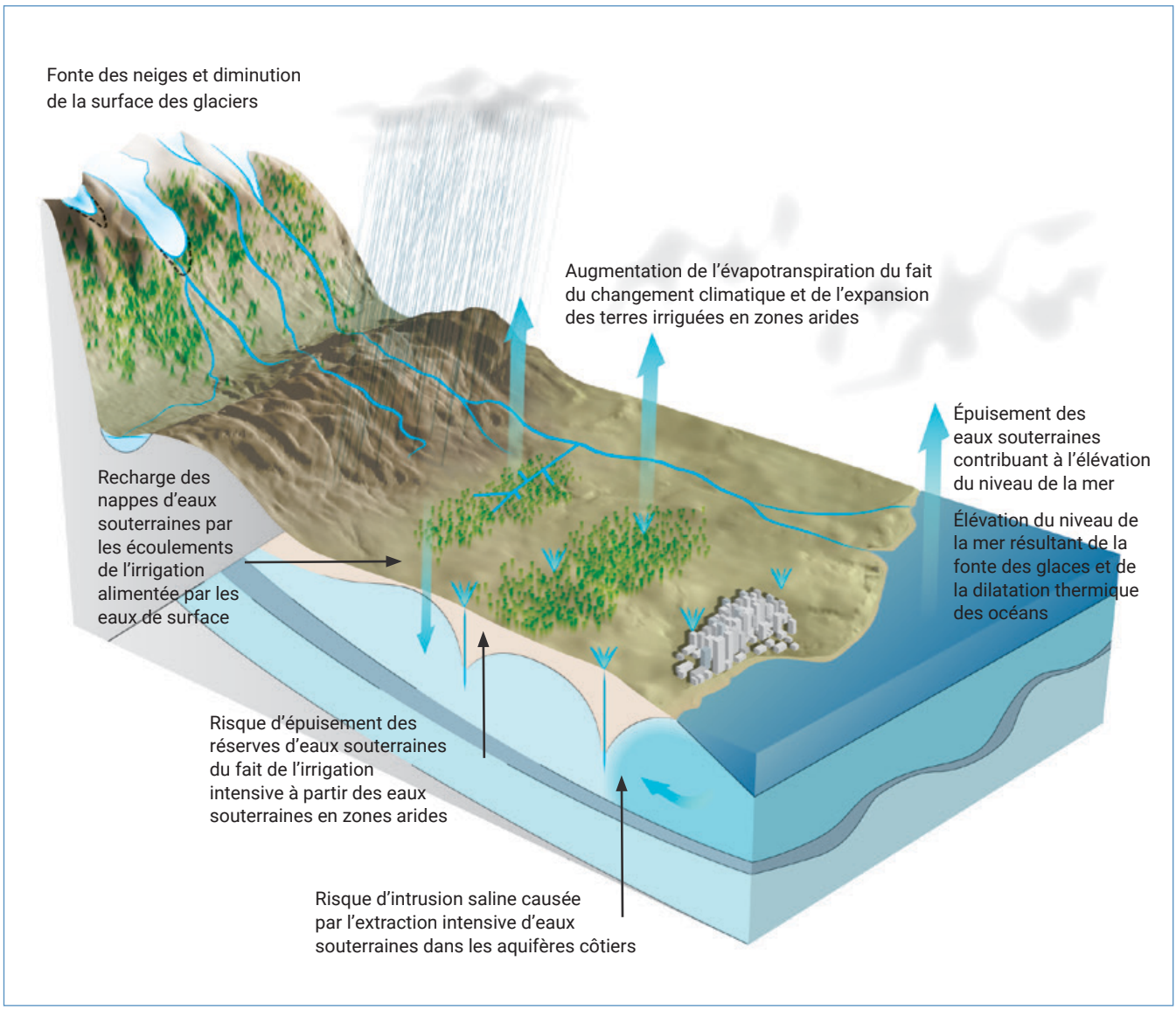
Le changement climatique a un impact direct sur la reconstitution naturelle des nappes souterraines. Cette reconstitution peut se produire directement, à travers un terrain, grâce aux précipitations (recharge diffuse) et par la drainance des eaux de surface, notamment les cours d'eau intermittents, les zones humides et les lacs (recharge ciblée). La drainance des eaux de surface prédomine dans les zones arides[20] (Scanlon et al., 2006 ; Cuthbert et al., 2019a). À l'échelle mondiale, les estimations moyennes par modélisation de la recharge diffuse contemporaine (années 1960 à 2010) varient entre 110 et 140 mm/an (Mohan et al., 2018 ; Müller Schmied et al., 2021), soit l'équivalent de 15 à 19 km³/an, et concernent environ 40 % des ressources mondiales en eau douce renouvelables (Müller Schmied et al., 2021). Toutefois, des incertitudes notables persistent dans les prédictions concernant les effets du changement climatique sur la recharge des nappes souterraines à l'échelle mondiale. Ces lacunes découlent principalement des limites dans la représentation du changement climatique par les modèles de la circulation mondiale (MCG) et de la recharge des nappes phréatiques par les modèles de l'hydrologie mondiale (Reinecke et al., 2021).

Modifications des précipitations et évapotranspiration

Le climat et la couverture terrestre déterminent en grande partie les taux de précipitations (P) et d'évapotranspiration (ET) tandis que la nature du sol sous-jacent et la géologie déterminent si un excédent d'eau (P - ET) peut se diffuser vers un aquifère sous-jacent. L'amplification

[20] Les zones arides sont des régions ayant un climat moins humide, semi-aride ou hyper aride.

Figure 7.1 Principales interactions entre les eaux souterraines et le changement climatique : les impacts directs et indirects du changement climatique affectent les systèmes d'eaux souterraines



Source : adapté et révisé de Taylor et al. (2013a) par les auteurs du rapport.

des taux d'ET dans le contexte du réchauffement climatique limite la génération d'excédents d'eau. On estime que l'ET a augmenté d'environ 10 % à l'échelle planétaire entre 2003 et 2019 (Pascolini-Campbell et al., 2021).

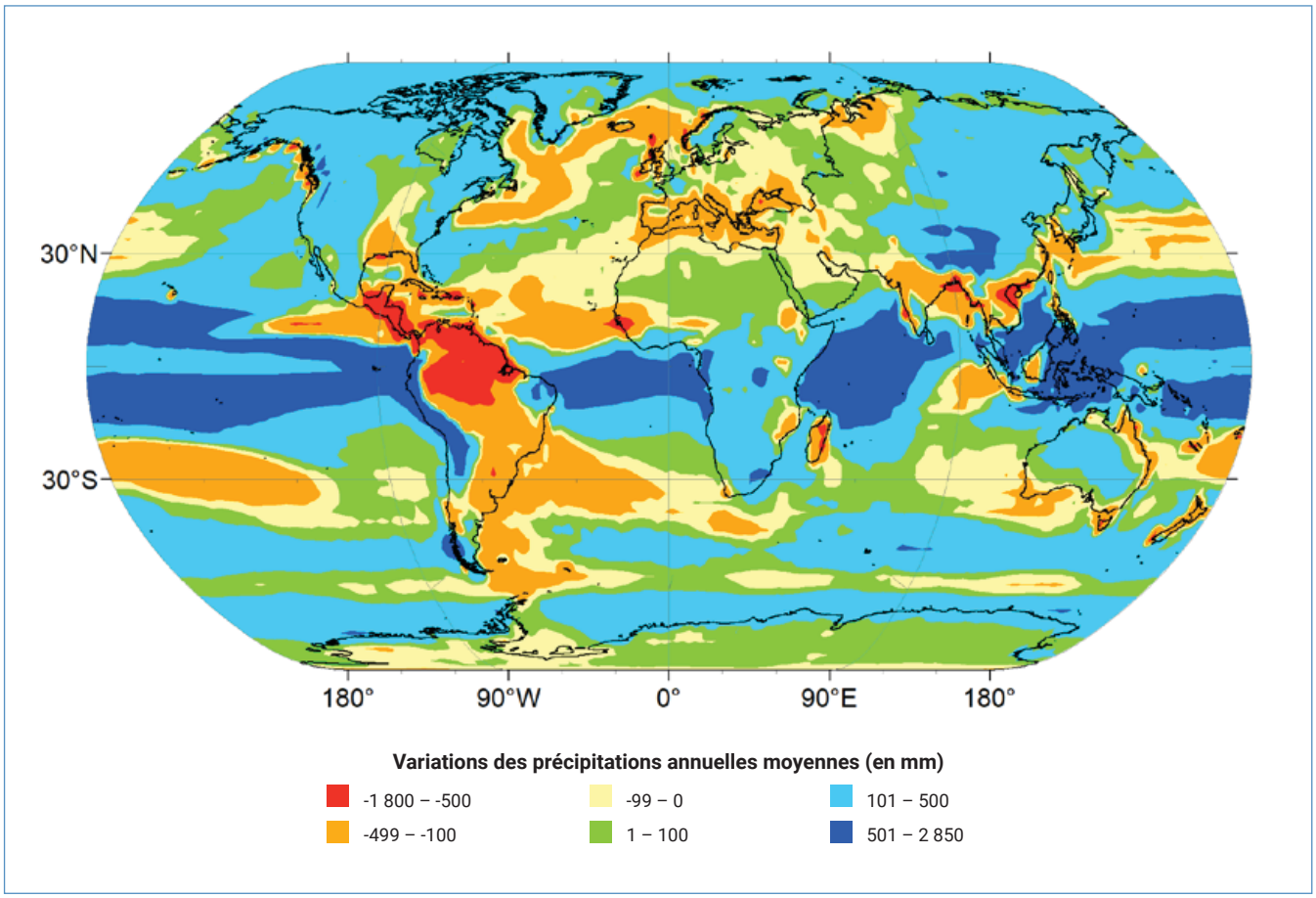
La variabilité spatiale de la recharge diffuse dépend principalement de la répartition des précipitations. Toutefois, au fur et à mesure que la planète se réchauffe, la quantité de pluie ou de neige, de même que le lieu et le moment où elles tomberont, demeurent très incertains. L'une des conclusions principales du cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2014a, p. 1085), à savoir l'idée selon laquelle les réponses hydrologiques au changement climatique peuvent être décrites en ces termes « l'humidité devient plus humide, la sécheresse plus sèche », s'est révélée trop simpliste depuis lors (Byrne et O'Gorman, 2015). Des réductions considérables des précipitations sont prévues dans les régions équatoriales humides des Amériques et de l'Asie, les plus fortes augmentations devant, elles, se produire au niveau des océans sous les tropiques et non au niveau des terres (figure 7.2).

L'intensification des précipitations constitue l'un des impacts connus et fréquents du changement climatique sur la reconstitution des nappes souterraines

Au fil du temps, il s'établit une corrélation entre les événements climatiques extrêmes (sécheresses et inondations), qui influencent fortement la recharge des nappes souterraines, et des phénomènes de variabilité climatique tels que l'oscillation australe El Niño (ENSO, voir par exemple Taylor et al., 2013b ; Kolusu et al., 2019) et l'oscillation multidécennale de l'Atlantique (Green et al., 2011). Il n'existe cependant aucun consensus sur la manière dont les régimes de contrôle à grande échelle de la variabilité climatique comme ENSO réagiront au réchauffement climatique (McPhaden et al., 2020). Lors de la sécheresse du millénaire en Australie (1995-2010), les réserves d'eaux souterraines dans le bassin de Murray-Darling ont diminué de manière substantielle et continue, soit d'environ 100 ± 35 km³ de 2000 à 2007, en raison d'une forte réduction de la recharge et d'une absence de précipitations extrêmes (Leblanc et al., 2009). Cependant, des conditions climatiques plus humides n'entraînent pas systématiquement une plus grande recharge des nappes souterraines : l'incidence des précipitations hivernales plus importantes (x 2,5) dans le sud-ouest des États-Unis lors des années ENSO, par exemple, peut donner lieu à une augmentation de l'évapotranspiration à partir des floraisons désertiques, qui consomment en grande partie ou entièrement le surplus d'eau (Scanlon et al., 2005).

L'intensification des précipitations constitue l'un des impacts connus et fréquents du changement climatique sur la reconstitution des nappes souterraines. Étant donné qu'un air plus chaud contient plus d'humidité, une évapotranspiration plus importante est nécessaire pour atteindre le point de condensation (rosée) dans le contexte du réchauffement planétaire.

Figure 7.2 Projections de l'évolution des précipitations annuelles moyennes à l'échelle mondiale du fait du changement climatique



Note : Les zones en rouge (bleu foncé) et marron (bleu clair) indiquent les lieux où des réductions (augmentations) considérables de précipitations sont prévues au cours de ce siècle. Les changements sont définis comme la différence entre l'estimation (2071 à 2100) de l'ensemble des précipitations annuelles moyennes par la CMIP5 (Cinquième phase du Projet de comparaison des modèles couplés) et l'observation (1979 à 2019) des précipitations annuelles moyennes par GPCP v2.3 (Projet mondial de climatologie des précipitations).

Source : Auteurs du rapport à partir des données de CMIP5 de Taylor et al. (2012a) et des données de GPCP de Adler et al. (2003).

Ce changement se traduit par une diminution des précipitations légères et une augmentation de la fréquence des fortes précipitations (Myhre et al., 2019). Cette « intensification » des précipitations est plus forte sous les tropiques (Allan et al., 2010), où la majorité de la population mondiale devrait vivre d'ici à 2050 (Gerland et al., 2014). Ce changement dans la répartition des précipitations mondiales induit, entre autres, une humidité des sols réduite et plus variable, des inondations plus fréquentes et plus intenses ainsi que des sécheresses plus longues et plus fréquentes.

La transition vers des précipitations moins fréquentes, mais plus abondantes, devrait améliorer la recharge des nappes souterraines dans de nombreux environnements. Il a été montré que les fortes précipitations contribuent, de manière disproportionnée, à la recharge des nappes souterraines en certains endroits des régions tropicales (Jasechko et Taylor, 2015 ; Cuthbert et al., 2019a ; MacDonald et al., 2021), y compris dans les terres arides où les précipitations extrêmes (fortes) créent des masses d'eau de surface éphémères qui assurent une recharge ciblée (Favreau et al., 2009 ; Taylor et al., 2013b ; Seddon et al., 2021). Cette contribution disproportionnée des fortes précipitations à la recharge des nappes souterraines a été constatée de la même manière sur les terres arides hors des tropiques, comme en Australie (Crosbie et al., 2012) et dans le sud-ouest des États-Unis (Small, 2005). Les augmentations épisodiques des réserves d'eau souterraine par leur recharge, lorsqu'estimées à partir des données satellitaires fournies par la mission GRACE[21] sur les terres arides du monde entier, s'expliquent par des précipitations annuelles extrêmes (> 90ème percentile) (figure 7.3). En comparaison, dans les régions tempérées que caractérisent des nappes souterraines peu profondes dont le niveau peut atteindre rapidement la surface du sol lors de fortes pluies, les augmentations potentielles de recharge sont limitées (Rathay et al., 2018) et des inondations par les eaux souterraines peuvent se produire (Macdonald et al., 2012).

Modifications affectant la glace et la neige

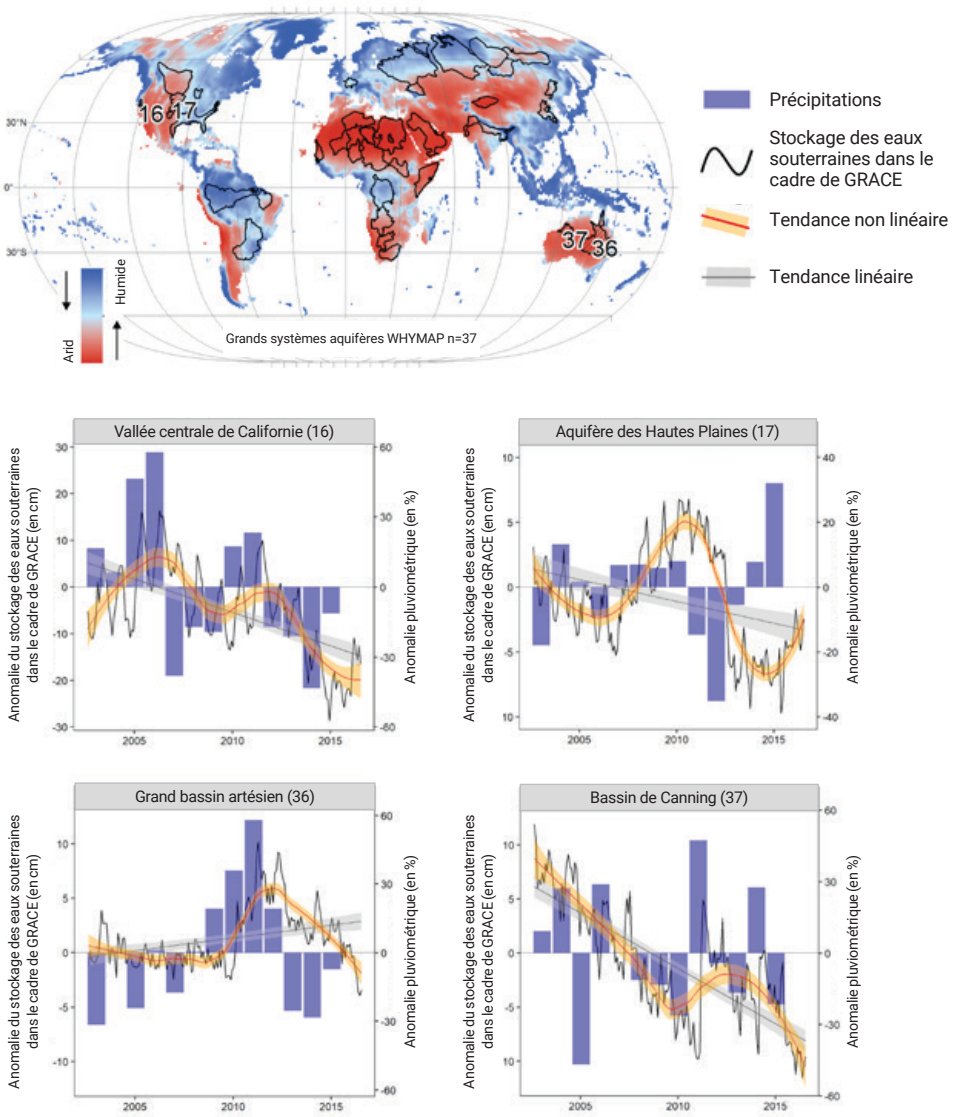
Sous toutes les latitudes nord continentales ainsi que dans les régions montagneuses et polaires, le réchauffement climatique modifie les régimes d'écoulement des eaux de fonte provenant de la glace et de la neige, affectant la recharge des nappes souterraines. Dans les régions tempérées, le réchauffement entraîne une moindre accumulation de la neige et une fonte plus précoce ainsi que davantage de précipitations hivernales qui tombent sous forme de pluie ainsi qu'une fréquence plus élevée des événements de pluies sur neige (Harpold et Kohler, 2017). L'addition de ces effets conduit à une réduction de la durée saisonnière et de l'intensité de la recharge, ce qui diminue le stockage de l'eau dans les bassins versants et accentue les étiages estivaux extrêmes (Dierauer et al., 2018). Dans les aquifères des vallées montagneuses, on note des changements dans la fréquence et l'amplitude : 1) des pics d'élévation du niveau de la surface des nappes en raison d'une fonte printanière précoce et 2) des baisses des niveaux des nappes souterraines causées par des périodes plus longues de faibles débits de base (figure 7.1) (Allen et al., 2010). Les faibles débits estivaux des cours d'eau peuvent être encore affaiblis par la baisse de niveau des nappes souterraines, de sorte qu'ils deviennent insuffisants pour répondre aux besoins domestiques et agricoles en eau (voir la section 7.2.2) et maintenir les fonctions écologiques telles que les habitats aquatiques des poissons et d'autres espèces. Ces changements hydrologiques sont aggravés par la température plus élevée des étiages estivaux (Dierauer et al., 2018).

Les conséquences du recul des glaciers alpins sur les systèmes de nappes souterraines sont encore mal comprises. Lorsque les glaciers reculent sous l'effet du changement climatique, davantage d'eau de fonte est initialement générée, et ce jusqu'à un maximum connu sous le nom de *Peak Water* (hauteur d'eau maximale) avant de diminuer au fur et à mesure que les glaciers continuent de reculer. On considère qu'environ la moitié des bassins versants glaciaires du monde ont dépassé leur hauteur d'eau maximale (Huss et Hock, 2018). Dans les Andes tropicales du Pérou, les débits d'eau de fonte des glaciers diminuent régulièrement

[21] Gravity Recovery and Climate Experiment : grace.jpl.nasa.gov/mission/grace-fo/.

Figure 7.3

Évolution du stockage mensuel des eaux souterraines et des précipitations annuelles dans quatre grands systèmes aquifères des zones arides des États-Unis et de l'Australie



Note : Les années de précipitations extrêmes (90ème percentile) sont 2006 (Vallée Centrale), 2015 (Aquifère des grandes plaines des États-Unis), 2011 (Grand bassin artésien) et 2011 (Bassin de Canning). Les séries chronologiques mensuelles des variations dans le stockage des eaux souterraines ont été obtenues à partir des données satellitaires de la mission GRACE avec les variations de précipitations annuelles fournies par l'Unité de recherche sur le climat (CRU) v. 4.01 ; (Harris et al., 2014) et correspondaient à des tendances non linéaires et linéaires. Les enveloppes ombrées autour des lignes d'évolution indiquent un intervalle de confiance de 95 % des tendances ajustées ; les emplacements des quatre grands systèmes aquifères (définis par WHYMAP, 2008) sont indiqués sur la carte du monde en haut à gauche, l'indice d'aridité variant du bleu au rouge.

Source : auteurs, basé sur Shamsudduha et Taylor (2020).

après avoir dépassé leur hauteur d'eau maximale, mais pendant la saison sèche, les nappes souterraines continuent de fournir de l'eau aux cours d'eau, permettant le maintien des débits de base pendant la saison sèche soumise à un stress hydrique (Somers et al., 2019). De même, des analyses récentes mettent en évidence des augmentations de la recharge ciblée en raison de l'augmentation des apports d'eau de fonte au débit des cours d'eau dans les zones arides glaciaires (Liljedahl et al., 2017). À plus long terme, sous l'effet du changement climatique, une réduction de la recharge se produit du fait de l'augmentation de l'l'évapotranspiration, qui peut réduire l'apport d'eaux de fonte générant une recharge ciblée au sortir des étiages estivaux (Taylor et al., 2013a).

Le gel saisonnier des sols, qui touche environ 50 % des terres exposées dans l'hémisphère nord (Zhang et al., 2003), est un important facteur de régulation des infiltrations de la fonte des neiges et influence fortement le volume et la période des ruissellements hivernaux et printaniers dans les régions froides (Hayashi, 2013). De 1901 à 2002, l'étendue du gélisol saisonnier dans l'hémisphère nord a reculé de 7 % en raison de l'augmentation des températures de l'air (Lemke et al., 2007). Le changement climatique modifie également la

répartition et l'étendue du permagel, altérant l'humidité des sols, les variations saisonnières du débit des cours d'eau et la répartition de l'eau stockée au-dessus et dans le sol (Walvoord et Kurylyk, 2016). Sous l'effet du changement climatique, le dégel accru du permagel diminue la répartition et l'épaisseur de celui-ci, ce qui crée de nouveaux conduits latéraux pour les eaux souterraines, conduits qui accroissent les interconnexions entre aquifères et eaux de surface (Lamontagne-Hallé et al., 2018). Ce changement explique le paradoxe observé, dans l'Arctique, de l'existence de l'humidification (soit l'augmentation des débits de base vers les rivières en aval) et de l'assèchement (soit la réduction des zones humides et des lacs en altitude).

Élévation du niveau des mers et salinisation des aquifères côtiers

Les aquifères côtiers forment l'interface entre les systèmes hydrologiques océaniques et terrestres ; ils constituent une source essentielle d'eau douce pour les populations des régions côtières. L'élévation du niveau de la mer d'environ 3 mm/an depuis 1990 — contre environ 1 mm/an entre 1902 et 1990 (Dangendorf et al., 2017) — a provoqué l'intrusion d'eau de mer dans les aquifères côtiers du monde entier (Michael et al., 2013). Outre l'élévation du niveau de la mer, l'intrusion d'eau de mer dépend de plusieurs facteurs, y compris la géologie et la topographie côtières ainsi que la reconstitution et l'exploitation des nappes d'eau douce souterraines (Stigter et al., 2014). La menace que représente l'élévation du niveau de la mer pour les eaux souterraines est plus grande dans les deltas de faible altitude (les deltas du Gange-Brahmapoutre et du Mékong par exemple) et les îles dont les taux d'écoulement des nappes souterraines sont limités comme les petits États insulaires en développement (PEID) (Holding et al., 2016).

Les effets de l'élévation du niveau de la mer sur l'intrusion d'eau de mer sont souvent minimes par rapport à ceux de l'extraction d'eaux souterraines

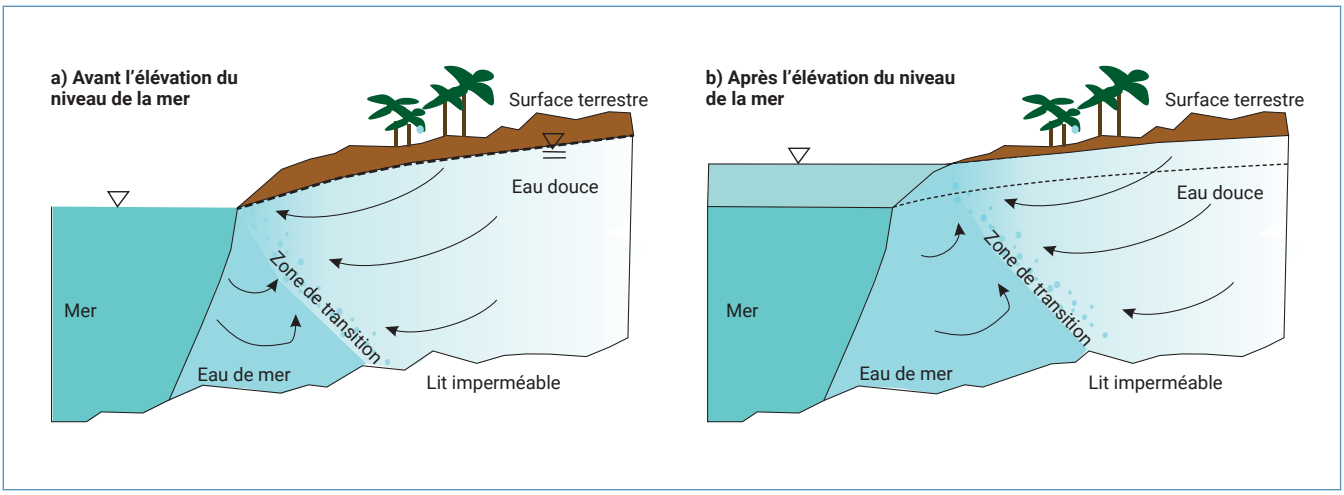
L'intrusion d'eau de mer est la conséquence d'un recul vers l'intérieur des terres du front entre eau douce et eau salée dans le sous-sol (figure 7.4). Les conséquences de l'élévation du niveau de la mer sont aggravées par les inondations d'eau de mer lors des ondes de tempête, des cyclones (Holding et Allen, 2015 ; Ketabchi et al., 2016 ; Shamsudduha et al., 2020) et des tsunamis (Villholth, 2013b), causant des intrusions verticales et latérales dans l'aquifère. Les atolls (soit les îles de récifs coralliens) sont des exemples extrêmes de ces environnements vulnérables (Werner et al., 2017), où les lentilles d'eau douce souterraine sont très dynamiques et hétérogènes en raison des effets combinés d'une géologie complexe, de phénomènes océaniques épisodiques, d'une forte variabilité climatique et d'interventions humaines (changement dans l'occupation des sols et du couvert végétal, pompage des eaux souterraines par exemple).

Les effets de l'élévation du niveau de la mer sur l'intrusion d'eau de mer sont souvent minimes par rapport à ceux de l'extraction d'eaux souterraines (Ferguson et Gleeson, 2012). De ce fait, l'intrusion d'eau de mer est souvent constatée de façon plus marquée dans les aquifères côtiers exploités de façon intensive et ayant une forte densité de population (par exemple Jakarta ou Gaza, État de Palestine). Le pompage intensif des eaux souterraines peut accélérer l'intrusion d'eau de mer du fait des affaissements de terrain comme cela a été observé en Australie, au Bangladesh, en Chine, en Indonésie, en Arabie saoudite et aux États-Unis (Polemio et Walraevens, 2019 ; Nicholls et al., 2021), où les taux de subsidence peuvent dépasser les taux prévus d'élévation du niveau de la mer. Les deltas de faible altitude, dans lesquels le sous-sol est dominé par des sédiments argileux susceptibles d'être compactés en raison de l'abaissement du niveau des nappes souterraines, sont particulièrement vulnérables à l'intrusion d'eau de mer (Herrera-García et al., 2020).

Autres conséquences directes du changement climatique sur la qualité des eaux souterraines

Le changement climatique fait peser des risques directs sur la qualité des eaux souterraines, non seulement en raison de l'amplification des phénomènes de précipitations extrêmes mais aussi en raison des réductions de la recharge des nappes. Les fortes précipitations (>10 mm/jour par exemple) peuvent amplifier la recharge et maintenir des contaminants tels que le chlorure et le nitrate dans la zone non saturée, située immédiatement au-dessus des aquifères dans les terres arides (voir Gurdak et al., 2007) et les régions tempérées (Graham et al., 2015) ;

Figure 7.4 Impact de l'élévation du niveau de la mer (SLR) sur l'intrusion d'eau de mer dans un système aquifère côtier non confiné en pente



Source : adapté de Ketabchi et al. (2016) par les auteurs du rapport.

Le changement climatique fait peser des risques directs sur la qualité des eaux souterraines, non seulement en raison de l'amplification des phénomènes de précipitations extrêmes mais aussi en raison des réductions de la recharge des nappes

en outre, les ruissellements de surface peuvent intercepter des déchets mal contenus et des produits chimiques stockés sur le sol ou à proximité, qui s'infiltrent ensuite dans les aquifères (OMS, 2018). Dans les zones où l'assainissement est insuffisant, ces événements peuvent également provoquer l'évacuation d'agents pathogènes microbiens fécaux et de produits chimiques (les nitrates par exemple) à travers les sols peu profonds jusqu'à la nappe souterraine (voir Taylor et al., 2009 ; Sorensen et al., 2015 ; Houéménou et al., 2020), à laquelle contribuent parfois les écoulements par des canaux tels les macropores du sol (Beven and Germann, 2013). En effet, une corrélation a été établie entre la recharge des nappes due à de fortes pluies dans de tels environnements et certaines épidémies de maladies diarrhéiques, notamment le choléra (Olago et al., 2007 ; De Magny et al., 2012). Les changements de méthode d'assainissement induits par la sécheresse dans la ville de Ramotswa au Botswana, pays semi-aride, ont entraîné le passage d'un assainissement par l'eau (toilettes à chasse d'eau) à des installations sanitaires sur site (les latrines à fosse par exemple), qui ont exacerbé le risque de contamination des nappes souterraines (McGill et al., 2019).

La diminution de la recharge des nappes souterraines attribuées au changement climatique dans la région méditerranéenne (voir Stigter et al., 2014) a provoqué une concentration de solutés tels le chlorure, le nitrate et l'arsenic dans les sols et les aquifères peu profonds, en raison d'une évaporation accentuée et d'une dilution plus faible (Mas-Pla et Menció, 2019).

Les effets du réchauffement climatique et de l'apparition d'îlots de chaleur urbains sur les températures du sous-sol ont également des répercussions sur la qualité des eaux souterraines, du fait des modifications de solubilité et de concentration de contaminants tels que le manganèse et le carbone organique dissous (Taniguchi et al., 2007 ; Riedel, 2019 ; McDonough et al., 2020). Le dégel du permagel libère des gaz à effet de serre (méthane, dioxyde de carbone, oxyde nitreux entre autres) et augmente les risques de contamination liés aux opérations minières en raison d'une plus grande connexion hydrologique entre eaux souterraines et eaux de surface.

7.2.2 Impacts indirects du changement climatique

L'augmentation des extractions d'eaux souterraines découle indirectement du changement climatique tandis que les sociétés s'efforcent de s'adapter à l'augmentation de l'évapotranspiration associée au réchauffement climatique (figure 7.1) ainsi qu'à la variabilité accrue et à la baisse générale de l'humidité des sols comme de la disponibilité des eaux de surface. En effet, c'est en raison de ses effets indirects sur la demande en eau d'irrigation que le changement climatique a sans doute ses répercussions les plus importantes sur les

nappes souterraines (Taylor et al., 2013a). Les stratégies de recours aux eaux souterraines pour s'adapter à des précipitations plus variables (moins fiables) et pour répondre à l'augmentation de la demande alimentaire mondiale (chapitre 3) ont des conséquences évidentes sur la gouvernance et la gestion durables des nappes souterraines (chapitres 2 et 10) ; elles peuvent mener à l'épuisement ou la contamination des ressources en eaux souterraines, avoir des répercussions sur les flux environnementaux (De Graaf et al., 2019 ; Jasechko et al., 2021) et mettre en danger les écosystèmes dépendant des eaux souterraines (chapitre 6). La modélisation à l'échelle mondiale suggère qu'entre 1991 et 2016, l'irrigation représentait environ 65 % des prélèvements d'eau douce dans le monde et environ 88 % de la consommation d'eau (Müller Schmied et al., 2021) ; 25 % de tous les prélèvements et 37 % de la consommation totale concernaient les eaux souterraines selon les estimations. Cette vaste redistribution de l'eau des rivières, des lacs et des eaux souterraines vers les terres arables a entraîné : a) un épuisement des nappes souterraines dans les régions où l'irrigation est principalement alimentée par celles-ci ; b) une accumulation d'eau souterraine à la suite de la recharge par les flux de retour de l'irrigation alimentée par les eaux de surface ; c) des modifications climatiques au niveau local suite à l'augmentation de l'évapotranspiration depuis les terres irriguées (figure 7.1). L'expansion de l'agriculture irriguée et pluviale complique également la relation entre le changement climatique et les nappes souterraines étant donné que les agro-écosystèmes gérés ne répondent pas aux variations de précipitations de la même manière que les écosystèmes naturels.

L'engorgement des terres continentales, amplifié par l'irrigation par eaux de surface et l'augmentation de la recharge due à la conversion de la végétation naturelle en cultures à racines peu profondes (Favreau et al., 2009), peut entraîner une élévation du niveau des nappes souterraines et la salinisation des sols par des flux capillaires ascendants qui s'évaporent ensuite. De ce fait, de nombreuses régions irriguées dans le monde font face à ces deux problèmes, à savoir la salinisation et l'engorgement, qui affectent actuellement plus de 20 % de l'ensemble des régions irriguées dans le monde (Singh, 2021).

7.3 Résilience et vulnérabilité des systèmes aquifères au changement climatique

Avec un volume estimé à environ 23 millions de km³ logé sur 2 km de profondeur dans la partie supérieure de la croûte continentale terrestre, les nappes souterraines constituent la plus importante réserve d'eau douce la plus largement répartie sur Terre (Gleeson et al., 2016). Bien qu'une petite fraction de ce volume (moins de 6 %) soit considérée comme « moderne » (c'est-à-dire s'étant constituée il y a moins de 50 ans), ce volume (environ 1,4 km³) est néanmoins équivalent à une masse d'eau d'une profondeur d'environ 3 m, répartie sur toute la surface des continents, surpassant tous les autres composants sous forme non gelée du cycle hydrologique actif. La relation des systèmes d'eaux souterraines au changement climatique diffère fondamentalement de celle des systèmes d'eaux de surface étant donné que le stockage distribué des eaux souterraines provient de recharges qui ont eu lieu sur des périodes allant de plusieurs années à des décennies, voire des millénaires (Ferguson et al., 2020). Ces temps de séjour des nappes souterraines expliquent la résilience relative des systèmes aquifères, par rapport aux eaux de surface, vis-à-vis de la variabilité et du changement climatiques comme le montrent les solutions fondées sur les eaux souterraines pour lutter contre les sécheresses (section 7.4) et les écarts dans le temps entre l'extraction, l'épuisement et la recharge des nappes souterraines (Cuthbert et al., 2019b). Dans de nombreuses parties du monde, la mise en place d'un approvisionnement en eau résilient au changement climatique passera par un emploi des eaux souterraines couplé à celui des fleuves, des lacs et des réservoirs d'eau de surface. Il reste encore beaucoup à faire pour optimiser la gestion conjointe de ces sources, notamment en reconnaissant davantage que ces systèmes sont souvent interconnectés ; dans les zones humides, les eaux souterraines alimentent principalement les rivières et d'autres systèmes d'eau de surface tandis que dans les zones arides, les débits des rivières intermittentes alimentent souvent les nappes souterraines (Scanlon et al., 2016).

La relation des systèmes d'eaux souterraines au changement climatique diffère fondamentalement de celle des systèmes d'eaux de surface

7.3.1 La résilience des systèmes aquifères au changement climatique

La résilience naturelle des systèmes aquifères au changement climatique varie considérablement et dépend principalement de la géologie, la végétation, la topographie et le climat, tant passé que présent. Les systèmes aquifères constitués de séquences de roches sédimentaires épaisses et expansives (calcaire, grès), qui laissent passer et stockent généralement de grandes quantités d'eaux souterraines, sont plus résilients à la variabilité et au changement climatiques que les systèmes aquifères au sein d'environnements de roches dures (roches cristallines fissurées par exemple), qui possèdent des capacités plus limitées de transmission et de stockage des eaux souterraines (Cuthbert et al., 2019b). Les systèmes aquifères en zones humides, qui sont constamment rechargés, peuvent être plus vulnérables aux dérèglements climatiques tels que la sécheresse mais peuvent aussi se restaurer assez rapidement. En revanche, les systèmes aquifères en zones arides, où la recharge est faible et occasionnelle, sont moins vulnérables aux courtes variabilités climatiques (saisonnière à pluriannuelle) qu'aux bouleversements climatiques à long terme dont ils tarderont à se remettre (Opie et al., 2020). La résilience, au changement climatique, des prélèvements d'eau provenant de l'exploitation des aquifères est aussi fonction du contexte (Gleeson et al., 2020b) et dépend de l'intensité des extractions d'eaux souterraines, entre autres facteurs. Par exemple, l'extraction modérée d'eau à usage domestique à partir d'aquifères de roches cristallines altérées à faible capacité de stockage reconstitués de façon annuelle à travers l'Afrique équatoriale humide n'entraîne pas généralement l'épuisement des nappes souterraines. L'extraction d'eau souterraine en grande partie « fossile » à partir des systèmes aquifères sédimentaires régionaux (grès de Nubie, sables du Kalahari par exemple) dans les zones arides d'Afrique (MacDonald et al., 2021) est résiliente au changement climatique mais, en fin de compte, non durable et tributaire de la quantité d'eau souterraine stockée et disponible.

7.3.2 Vulnérabilité des systèmes aquifères au changement climatique

Les systèmes aquifères qui sont vulnérables au changement climatique comprennent les aquifères pour lesquels ces impacts (présentés dans la section 7.2) sont, en grande partie, indépendants des extractions réalisées par les humains (exemples 1 à 4) et ceux pour lesquels l'intensité de ces extractions contribue à accroître la vulnérabilité au changement climatique (exemples 5 à 8) :

1. *Les systèmes aquifères côtiers et deltaïques de faible relief,* tels ceux que l'on trouve dans les mégadeltas et les PEID d'Asie[22], qui sont vulnérables à l'élévation du niveau de la mer, aux ondes de tempête et aux répercussions du changement climatique sur leur recharge ;
2. *Les systèmes aquifères des latitudes nord continentales ou des zones alpines et polaires* où la recharge et le déversement à long terme sont affectés par les variations du régime des eaux de fonte (les montagnes Rocheuses, le bassin de l'Indus par exemple) et une fonte du permagel (au Canada, en Russie) qui augmente la connectivité hydrologique et les risques de contamination ;
3. *Les aquifères dans les villes à faible revenu en pleine expansion* (Dakar, Lucknow, Lusaka par exemple) de même que dans *les grandes communautés déplacées et informelles* (au Bangladesh, au Kenya, au Liban par exemple) qui dépendent de l'assainissement sur place (latrines à fosse, fosses septiques), où la fréquence accrue des pluies extrêmes peut amplifier l'entraînement par l'eau des contaminants de surface et de ceux proches de la surface ;
4. *Les aquifères alluviaux peu profonds sous-jacents aux rivières saisonnières dans les zones arides*, alimentés par le ruissellement des rivières intermittentes (Duker et al., 2020), dont la capacité de stockage dépend en grande partie de la taille de la rivière et de l'épaisseur des dépôts de sables ; les systèmes plus petits ont une capacité de stockage limitée et sont très sensibles à des précipitations plus variables, notamment aux sécheresses plus longues qu'apporte le changement climatique ;

[22] www.unesco.org/new/fr/natural-sciences/priority-areas/sids/resources/sids-list/

5. *Les systèmes aquifères sujets au pompage intensif pour l'irrigation par eaux souterraines dans les zones arides* (dans le nord-ouest de l'Inde, la Vallée Centrale de Californie et les Grandes Plaines aux États-Unis, l'aquifère du Souss, au Maroc, les plaines de Chine du Nord par exemple) où la consommation en eau souterraine est élevée et où la réduction de la recharge, en raison du changement climatique, pourrait menacer la viabilité de l'agriculture irriguée ;
6. *Les aquifères sujets au pompage intensif pour les villes en zones arides* (Lahore, San Antonio par exemple) où la réduction potentielle de la recharge en raison du changement climatique pourrait menacer la viabilité de l'approvisionnement public en eau, étant donné que d'autres sources d'eau pérennes sont soit limitées, soit inexistantes ;
7. *Les aquifères côtiers sujets à pompage intensif* (ville de Gaza, Jakarta, Tripoli par exemple), où le pompage réduit le niveau des nappes souterraines et accroît considérablement l'intrusion d'eaux salines au-delà de celles causées par l'élévation du niveau de la mer seule ;
8. *Les systèmes aquifères à faible capacité de stockage/à faible recharge en zones arides* (Bulawayo, Ouagadougou par exemple), où les sources d'eau pérennes alternatives sont limitées ou inexistantes, et où la recharge est occasionnelle, si bien que de petites réductions de la recharge peuvent entraîner l'épuisement des nappes souterraines.

7.4 Adaptations au changement climatique basées sur les eaux souterraines par l'intervention humaine

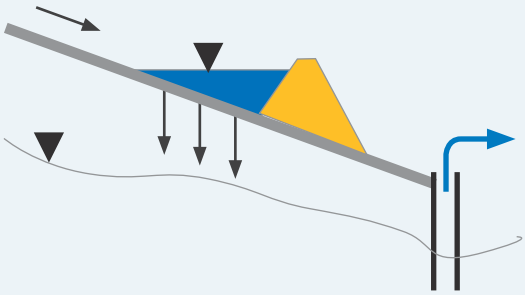
Les adaptations au changement climatique basées sur les eaux souterraines tirent profit du stockage distribué des nappes souterraines et de la capacité des systèmes aquifères à stocker des excédents d'eau (saisonniers, ponctuels). Ces systèmes subissent des pertes par évaporation nettement inférieures à celles des infrastructures conventionnelles telles que les barrages de surface. L'importance vitale des eaux souterraines en tant que tampon contre les impacts du changement climatique, à savoir non seulement les sécheresses et l'augmentation de l'évapotranspiration mais aussi la variabilité accrue de l'humidité et des eaux de surface (section 7.3), devrait augmenter au cours des prochaines décennies. Les « révolutions vertes » en Asie ont compté sur l'emploi permanent et général des nappes souterraines peu profondes pour l'irrigation, pendant la saison sèche, par les petits exploitants agricoles de même que sur leur résilience régionale accrue aux variations saisonnières de disponibilité de l'eau (Schneider et Asch, 2020). En Afrique tropicale, les appels se multiplient (Cobbing, 2020) pour puiser dans les réserves d'eaux souterraines afin d'améliorer la résilience de l'approvisionnement en eau et en nourriture face au changement climatique, en vue d'atteindre les ODD 2, 6 et 13, entre autres. Pour s'adapter aux pénuries d'eau dans des villes telles que Dar es-Salaam (Tanzanie) en 1997 et Le Cap (Afrique du Sud) en 2017, il a fallu non seulement procéder à des réductions de la demande en eau douce mais également mettre en œuvre des stratégies d'approvisionnement qui utilisaient davantage les eaux souterraines en tant que source d'eau douce résiliente au changement climat pouvant être utilisée conjointement avec les ressources en eau de surface (CoCT, 2019). En outre, améliorer l'assainissement et l'hygiène communautaires peut renforcer la résilience au changement climatique des approvisionnements en eau alimentés par nappes souterraines, au sein des communautés à faibles revenus densément peuplées, en réduisant les risques de contamination fécale (OMS, 2019).

Les interventions humaines pour lutter contre le changement climatique grâce aux eaux souterraines comprennent un ensemble de stratégies de gestion de la recharge des aquifères (MAR) en vue d'augmenter la disponibilité de l'eau douce (voir section 11.5). Dillon et al (2019) répartissent MAR en quatre grandes catégories : a) la modification du lit des cours d'eau, b) la filtration sur berge, c) l'épandage d'eau et d) les puits de recharge. Chaque catégorie est décrite dans l'encadré 7.1 avec des exemples d'application.

Encadré 7.1 Stratégies de gestion de la recharge des aquifères (MAR)

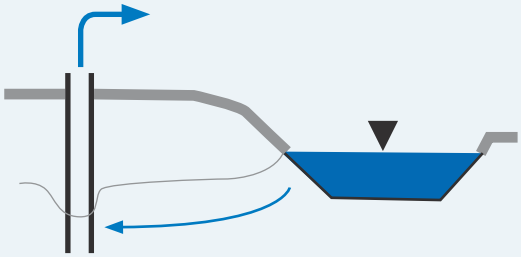
(*a*) La modification du lit des cours d'eau

La modification du lit des cours d'eau renvoie à des infrastructures telles que les petits barrages, les bassins et les fosses qui recueillent les écoulements de surface pour fournir de l'eau potable et de l'eau d'irrigation grâce à une infiltration orientée qui permet de remplir les aquifères sous-jacents. L'application de cette stratégie MAR a une longue histoire dans le cas des aquifères de roche dure de la péninsule indienne (Boisson et al., 2014) et les plaines alluviales du Rajasthan dans le nord-ouest de l'Inde (Dashora et al., 2018). On peut également citer les grands barrages de recharge à Oman, dont le fonctionnement se combine avec un épandage d'eau dans une série de bassins de recharge connectés (Dillon et al., 2019).



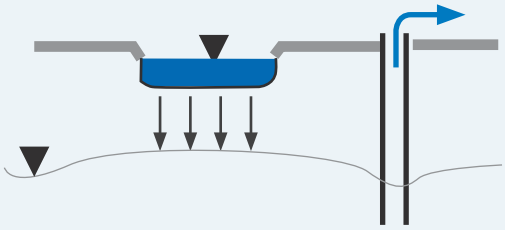
(*b*) La filtration sur berge

La filtration sur berge désigne un processus d'amélioration de l'infiltration des eaux de surface à travers l'extraction d'eaux souterraines près des rivières et d'autres étendues d'eau de surface, de sorte que le gradient hydraulique entre les eaux de surface et le puits de pompage s'accroît. Comme l'indiquent Dillon et al. (2019), l'approvisionnement en eau de Budapest est entièrement assuré par le filtrat des berges du Danube.



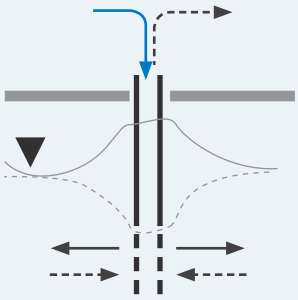
(*c*) L'épandage d'eau

L'épandage désigne l'utilisation des eaux de crue pour augmenter l'humidité des sols aux fins de la production alimentaire sur des terres arables sèches. Les projets d'épandage d'eau à partir des débits de crue du fleuve Colorado, en Arizona (États-Unis), se sont révélés utiles pour augmenter le stockage d'eau souterraine pour les villes en zones arides comme Phoenix et Tucson (Scanlon et al., 2016). Aux Pays-Bas, les eaux de rivières traitées provenant du Rhin sont transportées par des canalisations jusqu'aux zones de dunes côtières où elles s'infiltrent pour alimenter les nappes souterraines à partir de bassins (Sprenger et al., 2017).



(*d*) Les puits de recharge (Stockage en aquifères puis récupération, ASR)

L'utilisation de puits de recharge consiste à injecter de l'eau dans les aquifères par l'intermédiaire de puits. Cette pratique est souvent appelée Stockage en aquifères puis récupération (ASR) ou Stockage en aquifères, transfert et récupération (ASTR). En Europe du Nord, les excédents saisonniers (hivernaux) d'eaux de surface recueillis dans des réservoirs sont souvent transférés vers des aquifères peu profonds par des puits d'injection afin de répondre à l'augmentation anticipée de la demande en eau en été (Hiscock et al., 2011). Dans les régions côtières du Bangladesh, la résilience des communautés rurales à la salinité croissante de l'eau près des côtes a été améliorée grâce à la création de lentilles d'eau douce dans les aquifères confinés peu profonds et partiellement salés. Cela est réalisé au moyen de l'injection d'eau de bassin saisonnière provenant des excédents de crues ou d'eau de pluie collectés dans des puits drainés par gravité (Sultana et al., 2015). À Windhoek en Namibie, la résilience de l'approvisionnement en eau de la ville face à la variabilité et le changement climatiques a été renforcée grâce au transfert, par puits d'injection, d'eaux de surface saisonnières traitées dans le système aquifère de quartzite fissuré (Murray et al., 2018).



Source : basé sur AIH (2005).

7.5 Atténuation du changement climatique par les eaux souterraines grâce à l'énergie géothermique à faible teneur en carbone

L'énergie géothermique désigne la chaleur stockée et transmise par les sous-sols. Cette section s'intéresse aux eaux souterraines en tant qu'elles peuvent faciliter le stockage, le transport et l'extraction de l'énergie géothermique. Le développement de l'énergie géothermique joue un rôle essentiel dans la réduction des émissions de CO_2 et la transition vers des sources d'énergie durables. Bien que les fluides souterrains à haute enthalpie (>150 °C) puissent être utilisés pour produire de l'électricité et de la chaleur, les eaux souterraines de plus basse enthalpie (40 °C à 150°C) peuvent également être utilisées, principalement pour le chauffage. Même les eaux souterraines peu profondes à basse température (souvent entre 5 et 25 °C) peuvent être utilisées pour fournir un système de chauffage et de refroidissement à faible teneur en carbone au moyen de pompes à chaleur géothermiques (GSHP).

7.5.1 L'énergie géothermique pour la production d'électricité à faible teneur en carbone

La production d'électricité géothermique nécessite, en général, un forage profond pour accéder à de hautes températures et une perméabilité suffisante à de telles profondeurs pour permettre la libre circulation des fluides. Les fluides utilisés peuvent être des eaux souterraines naturelles dans des aquifères sédimentaires profonds (en Italie et en Californie par exemple) ou des sites magmatiques (au Salvador, en Islande, au Kenya par exemple). Par ailleurs, lorsque les roches ont une perméabilité limitée, elles peuvent être stimulées artificiellement ou fissurées hydrauliquement afin de permettre la circulation des fluides introduits, formant ainsi un système géothermique amélioré (EGS) tel qu'à Soultz-sous-Forêts en France. La production d'électricité nécessite habituellement la production de vapeur à la surface pour actionner des turbines. L'électricité peut toutefois être produite à des températures plus basses (<180 °C) dans des systèmes de cycle binaire à l'aide de l'eau chaude utilisée pour permettre l'évaporation des fluides organiques (du butane ou du pentane sous haute pression par exemple) qui font fonctionner les turbines.

L'une des principales chances offertes par l'énergie géothermique à basse enthalpie est qu'elle permet une décarbonisation des systèmes de chauffage et de refroidissement domestiques, commerciaux et industriels

En 2020, près de 30 pays produisaient un total de 95 TWhe d'électricité géothermique par an à partir d'une puissance totale de départ de 16,0 GWe. Ceci représente une augmentation de 3,7 GWe par rapport à 2015 pour un coût estimé de 10,4 milliards de dollars EU[23]. Les nations qui produisent le plus (en prenant en compte la capacité totale installée) sont les États-Unis, l'Indonésie, les Philippines, la Turquie et le Kenya, tous connus pour leurs zones géothermiques et volcaniques actives (Huttrer, 2021). Ces dernières années, la croissance relative de l'énergie éolienne et de l'énergie solaire a surpassé celle de l'électricité géothermique, ce qui reflète le faible coût et les faibles risques associés à leur emploi ainsi que leurs périodes d'amortissement plus courtes. Cependant, les centrales géothermiques sont, contrairement aux centrales éoliennes et solaires, parfaitement adaptées pour produire l'électricité courante de base. On prévoit que la puissance de base augmente d'environ 20 % entre 2020 et 2025 (Huttrer, 2021).

7.5.2 Utilisation des eaux souterraines pour des systèmes de chauffage et de refroidissement à faible teneur en carbone

L'une des principales chances offertes par l'énergie géothermique à basse enthalpie est qu'elle permet une décarbonisation des systèmes de chauffage et de refroidissement domestiques, commerciaux et industriels, qui représente au moins 40 % de la consommation d'énergie et des émissions de CO_2 mondiales (AIE, 2019b). En 2020, la capacité géothermique de base pour l'approvisionnement thermique direct (y compris les pompes à chaleur) était de près de 108 GWt, marquant un accroissement annuel d'environ 9 %, ayant permis de fournir annuellement 284 TWht (Lund et Tóth, 2020). Les nations les plus avancées dans ce domaine sont (dans l'ordre de leur capacité de base) la Chine, les États-Unis et la Suède, les pays scandinaves enregistrant une forte valeur par habitant (principalement grâce aux pompes à chaleur). Les pompes à chaleur géothermiques fournissent 78 GWt (72 %) de la capacité de base effective (Lund et Tóth, 2020).

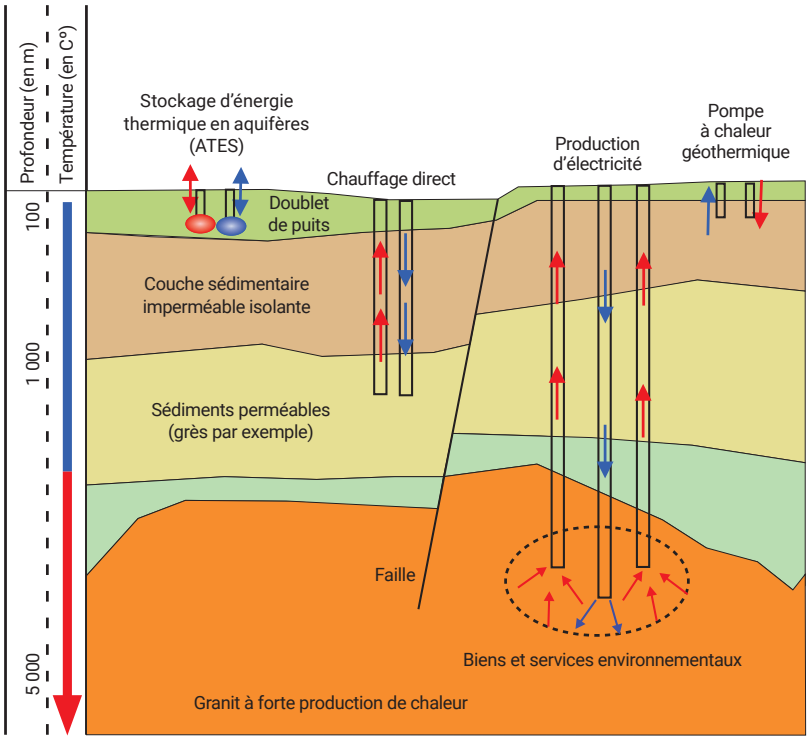
---

[23] Il convient de noter que le GW (gigawatt) est une unité de puissance (taux de fourniture d'énergie) tandis que le TWh (terawatt par heure) est une unité d'énergie totale fournie. Les indices *e* et *t* désignent respectivement l'énergie électrique et thermique.

Les nappes souterraines peu profondes (allant de 0 à 200 m) ont généralement une température plutôt constante qui est légèrement plus chaude que la température moyenne annuelle de l'air (figure 7.5). Par conséquent, cette température varie d'environ 5 °C dans le nord de la Scandinavie à plus de 25 °C en Afrique subsaharienne. La température augmente généralement de 2,5 à 3 °C tous les cent mètres de profondeur, de sorte qu'à une profondeur de 1,5 km, les températures approchent ou dépassent souvent les 50°C. S'il y a un aquifère disposant d'une forte transmissivité à de telles profondeurs, les eaux souterraines peuvent être utilisées pour le chauffage direct de bâtiments simples ou multiples (réseaux de chauffage urbain), de piscines, d'installation d'horticulture (serres) ou d'aquaculture. Après que la chaleur a été extraite des eaux souterraines grâce à un échangeur de chaleur, l'eau « thermiquement utilisée » est souvent renvoyée dans le réservoir par l'intermédiaire d'un ou plusieurs puits de réinjection afin de maintenir la pression du réservoir et d'éviter une contamination potentielle de la surface par des solutés naturels indésirables. Un tel système est appelé un doublet de puits (figure 7.5 –- Fridleifsson et al., 2008 ; Banks, 2012 ; Kramers et al., 2012).

Figure 7.5

Diagramme schématique montrant différents types de systèmes d'énergie géothermique, à savoir le stockage d'énergie thermique en aquifères (ATES), la pompe à chaleur géothermique (GSHP) et le système géothermique stimulé (SGS)



Source : adapté de Driscoll et Middlemis (2011) par les auteurs du chapitre.

Les grands bâtiments modernes (bureaux, centres de données, hôpitaux, etc.) ont un besoin important de refroidissement, même en hiver et sous climat tempéré. De nombreux processus industriels ont également besoin de refroidissement et la nécessité d'un refroidissement à faible teneur en carbone augmentera probablement avec la progression du changement climatique. Les eaux souterraines peu profondes et froides (de 10 à 12 °C dans de nombreuses régions du Royaume-Uni par exemple) sont bien adaptées pour recevoir un excédent de chaleur et permettre le refroidissement à travers un système de doublet de puits. Les eaux souterraines peu profondes et froides peuvent également être utilisées pour le chauffage à l'aide d'une pompe à chaleur géothermique. Une pompe à chaleur est un dispositif électrique réfrigérant qui transfère de la chaleur à partir d'un milieu froid (les eaux souterraines à 10 °C par exemple) à un milieu chaud (un système de chauffage central à 45 °C par exemple)[24]. Bien que les technologies solaires et éoliennes puissent générer de l'électricité par un procédé

[24] Il convient de noter que les pompes à chaleur n'ont pas besoin d'eaux souterraines : elles peuvent également extraire de la chaleur des sols et des roches non saturés/à faible perméabilité, des eaux de surface, des eaux usées et de l'air.

à faible teneur en carbone, il existe très peu de technologies à faible teneur en carbone permettant de générer de la chaleur. La pompe à chaleur est une technologie clé qui utilise l'électricité d'une manière très efficace pour chauffer et refroidir. Cette pompe peut générer 3,5 kW de chaleur dans un bâtiment pour chaque 1 kW d'électricité consommée, entraînant des réductions considérables des coûts et des émissions de CO_2. Depuis 2020, environ 6,5 millions de pompes à chaleur géothermiques ont été installées à travers le monde, ce qui en fait le segment du secteur géothermique à la croissance la plus rapide (Lund et Tóth, 2020).

L'utilisation d'un système géothermique à faible profondeur (à faible enthalpie) pour le chauffage et le refroidissement est particulièrement avantageuse sous les climats continentaux tempérés, où la température de l'air varie beaucoup d'une saison à l'autre et où la température des eaux souterraines est non seulement beaucoup plus chaude que la température de l'air en hiver, mais aussi beaucoup plus froide que la température de l'air en été. Dans ce cas, l'excédent de chaleur issu des processus de refroidissement, injecté dans le sol pendant l'été, peut être stocké dans l'aquifère et récupéré en hiver pour être utilisé. Ce processus est appelé stockage d'énergie thermique en aquifères (ATES). Dans les pays pionniers, tels que les Pays-Bas et la Suède, les sols et les eaux souterraines sont de plus en plus considérés comme l'un des composants (une source, un puits ou un « tampon » thermique saisonnier) dans les réseaux de chauffage et de refroidissement urbains flexibles de 5ème génération (voir Verhoeven et al., 2014, Buffa et al., 2019).

7.5.3 Impacts, risques et incitations

Le piégeage et le stockage du carbone désignent le processus consistant à stocker le carbone dans des aquifères profonds afin de freiner l'accumulation de dioxyde de carbone dans l'atmosphère

Les impacts environnementaux des systèmes géothermiques bien conçus sont limités mais ils peuvent être néfastes si les aquifères sont mal gérés. Lorsqu'il n'y a pas de réinjection des fluides géothermiques, la nappe souterraine peut s'épuiser et entraîner un affaissement du sol tel que cela a été observé à Shanghai en Chine (Banks, 2012). Lorsque les eaux souterraines « thermiquement utilisées » sont réinjectées, les risques sont moindres. Néanmoins, des mouvements du sol peuvent toujours survenir, et des systèmes de chauffage et de refroidissement à fortes densités peuvent provoquer des changements de température dans l'aquifère. Les variations nettes de température dans l'aquifère peuvent avoir des impacts sur l'environnement et rendre au final les ressources géothermiques moins adaptées pour l'exploitation. Par exemple, le cadre réglementaire néerlandais exige que les systèmes ATES soient plus ou moins équilibrés thermiquement afin d'éviter de telles variations de température (ATES néerlandais, 2016). Une réinjection d'eau souterraine mal gérée comporte également un certain risque, celui de mélanger de l'eau souterraine de bonne et de mauvaise qualité, ce qui peut entraîner une détérioration globale de la qualité des nappes souterraines. Pour les systèmes géothermiques profonds, soumis à des pressions de réinjection élevées, il faut pouvoir surveiller précisément le risque de micro-sismicité (Holmgren et Werner, 2021). Outre les impacts environnementaux, le développement de l'énergie géothermique peut se heurter à des limites économiques et des limites dues aux risques. Les coûts et les risques des projets ont tendance à augmenter avec la profondeur étant donné que le coût du forage augmente de manière disproportionnée avec la profondeur tandis que la connaissance hydrogéologique requise devient plus lacunaire. Une fois qu'un puits a été construit, l'exploitant doit faire face au défi quasiment omniprésent de prévenir le colmatage des puits de réinjection ainsi qu'aux coûts liés à la surveillance des performances, de la température et de la composition chimique du puits. Étant donné que le forage profond dans le but de trouver de nouvelles ressources géothermiques à enthalpie élevée implique un investissement initial conséquent et un important risque économique que causerait l'échec de l'exploration, on peut se demander si la production d'énergie géothermique doit être subventionnée selon un taux donné par MWh produit. Une solution plus appropriée consisterait peut-être à mettre en place un système d'assurance soutenu par le gouvernement ou par l'industrie afin de couvrir les risques liés au développement d'un nouveau projet d'énergie géothermique, comme cela a été fait aux Pays-Bas (RVO, 2015).

7.6 Atténuation du changement climatique grâce au captage et au stockage du carbone

Le piégeage et le stockage du carbone (CSC) désignent le processus consistant à stocker le carbone dans des aquifères profonds afin de freiner l'accumulation de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Ce processus est nécessaire parce que l'on considère que les puits naturels de dioxyde de carbone (CO_2) (soit les forêts, les océans et les sols) ne peuvent absorber les quantités croissantes de CO_2 émises par les humains et que l'on souhaite ainsi atténuer leurs répercussions au niveau du changement climatique. Le CSC permet de réduire les émissions de CO_2 provenant des sources ponctuelles telles que des processus industriels ou la production d'énergie grâce au captage chimique du CO_2 émis. Ce CO_2 est ensuite compressé et injecté dans des couches souterraines à des profondeurs supérieures à 800 m, où les pressions et les températures existantes sont suffisantes pour transformer le CO_2 gazeux en CO_2 liquide. Les sites géologiques qui sont adaptés au stockage du CO_2 sont notamment les aquifères profonds et les réservoirs d'hydrocarbures épuisés au-dessus desquels se trouve un aquitard. Le CO_2 vaporeux (moins dense) monte et migre à travers la formation mais il est physiquement piégé par la couverture rocheuse (aquitard). Le CO_2 provenant de sources uniques est stocké sur des sites pilotes pour la recherche sur le CSC (à Ketzin, en Allemagne par exemple (Wiese et Nimtz, 2019), à Lacq en France (Prinet et al., 2013), à Ain Salah en Algérie (Ringrose, 2018), à Aquistore au Canada (Lee et al., 2018a)) et dans des centres opérationnels (Sleipner et Snøhvit, Norvège (Chadwick et al, 2012 ; Ringrose, 2018), à Decatur aux États-Unis (Finley, 2014), à Gorgon en Australie (Trupp et al., 2021)). Des projets sont également conçus sur des sites industriels où de nombreux émetteurs de CO_2 peuvent utiliser le(s) même(s) site(s) de stockage (Porthos au Pays-Bas, Northern Lights en Norvège, Teesside au Royaume-Uni).

Parmi les projets de stockage géologique du CO_2 à grande échelle (c'est-à-dire des projets de l'ordre de 1 Mt de CO_2 par an), on trouve les projets Sleipner et Snøhvit en mer du Nord ainsi que le projet Quest au Canada (Gouvernement de l'Alberta, 2019). Sur chacun de ces sites, environ 1 Mt de CO_2, qui seraient sinon libérés dans l'atmosphère, sont capturées et stockées définitivement chaque année. Les grands aquifères salins, terrestres ou aquatiques, ont en théorie la capacité de stocker des milliards de tonnes de CO_2, bien que leur capacité en pratique soit plus faible (Bachu et al., 2007 ; Bradshaw et al., 2007 ; Bachu, 2015 ; Goodman et al., 2016 ; Celia, 2017). Étant donné que les sites de stockage sont souvent éloignés des grandes sources d'émissions et que le transport intercontinental du CO_2 entraîne des coûts considérables, le potentiel économique du piégeage et du stockage du carbone est propre à chaque pays et à chaque région. Dans la plupart des régions, les capacités de stockage elles-mêmes ne constituent pas une limitation du recours au CSC. Néanmoins, des subventions publiques sont encore nécessaires pour couvrir les coûts. Le CSC est considéré comme un outil important pour réduire les émissions issues des énergies fossiles utilisées par le secteur industriel et lorsqu'il est associé à la combustion de la biomasse et au piégeage direct dans l'air, il permet de parvenir à des émissions nettes négatives (GIEC, 2014b).

Chapitre 8

Perspectives régionales sur les eaux souterraines

8.1 **UNESCO**
Jayakumar Ramasamy, Anne Lilande et Samuel Partey

AIH
Seifu Kebede Gurmessa et Alan MacDonald*

8.2 **CEE-ONU**
Annukka Lipponen, Sarah Tiefenauer-Linardon, Sonja Koeppel et Andreas Scheidleder*****

Avec les contributions de Sharon Megdal (Water Resources Research Center, Université de l'Arizona), Nihat Zal (AEE) et Xuan Che (Division de la statistique de l'ONU)

8.3 **CEPALC**
Silvia Saravia Matus

CeReGAS
Alberto Manganelli et Lucía Samaniego

UNESCO
Miguel Doria et Camila Tori

Avec les contributions d'Alba Llavona et Lisbeth Naranjo (CEPALC)

8.4 **CESAP**
Solene Le Doze et Dennis Lee

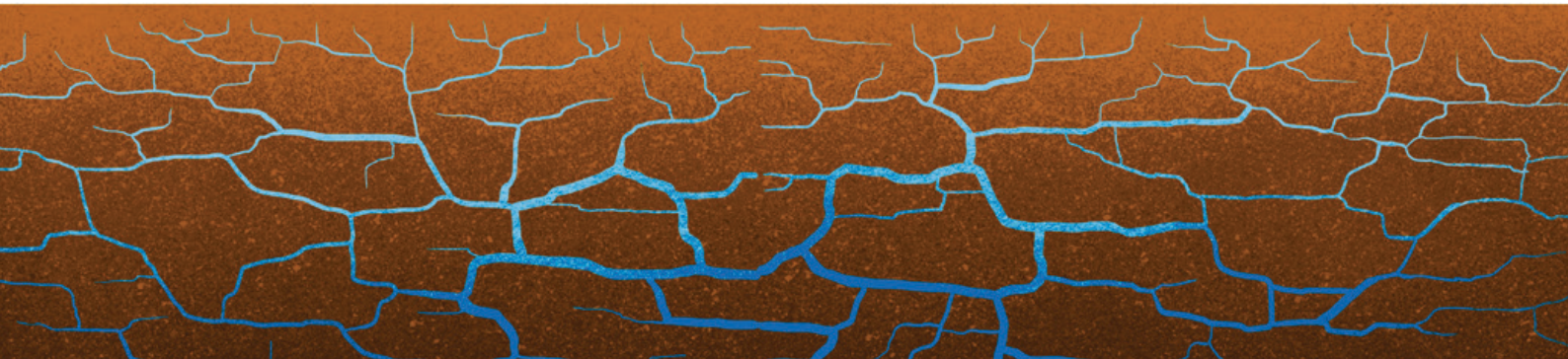
Avec la contribution de Danielle Gaillard-Picher (GWP)

8.5 **CESAO**
Ziad Khayat, Tracy Zaarour et Carol Chouchani Cherfane

* affilié au Service géologique britannique

** travaillant pour le Ministère de l'agriculture et des forêts de Finlande au moment de la publication

** Agence fédérale autrichienne pour l'environnement



8.1 Afrique subsaharienne

8.1.1 Introduction

Près de 400 millions de personnes vivant en Afrique subsaharienne n'ont pas accès aux services d'eau les plus élémentaires. La majorité d'entre elles vivent en zones rurales (OMS/UNICEF, 2021). Même dans les villes où les foyers sont plus souvent raccordés à un réseau de distribution, les habitants font face à des interruptions de service et à des débits d'eau inconstants en raison d'une forte demande qui ne cesse d'augmenter (Healy et al., 2020). Par conséquent, pour la plupart des pays, la priorité absolue est d'améliorer d'abord l'accès aux services de base puis à un approvisionnement domestique géré en toute sûreté. Cependant, le changement climatique exerce un surcroît de pression sur les eaux de surface disponibles, conduisant à des pénuries d'eaux récurrentes et à des sécheresses, qui risquent de remettre en question les progrès réalisés (Taylor et al., 2013a). À cette pression, s'ajoute la forte augmentation de la demande en eau due à la croissance démographique et l'urbanisation galopante, qui rend d'autant plus nécessaire un développement de services d'eau résilients au changement climatique.

Près de 400 millions de personnes vivant en Afrique subsaharienne n'ont pas accès aux services d'eau les plus élémentaires

L'exploitation des eaux souterraines est donc une solution à fort potentiel pour répondre aux besoins croissants en eau de l'Afrique subsaharienne, tant pour assurer la survie des populations que pour promouvoir le développement économique (Cobbing and Hiller, 2019). Étant la ressource en eau douce la plus importante disponible sur Terre, les eaux souterraines sont un moyen de subsistance très fiable, en particulier lors des périodes prolongées de précipitations insuffisantes et de sécheresses, et elles pourraient permettre de résoudre les problèmes de pénurie d'eau et de crises liées à la sécheresse (Banque mondiale, 2018a ; MacAllister et al., 2020). L'exploitation des nappes souterraines pour obtenir de l'eau potable grâce à des pompes communautaires et des puits domestiques privés est effective dans la plupart des pays. Toutefois, il est nécessaire d'accélérer cette exploitation et d'aller beaucoup plus loin. L'emploi des eaux souterraines pour l'irrigation et par l'industrie demeure limité sauf dans certaines zones particulières, comme en Afrique du Sud, en Zambie et au Zimbabwe (Pavelic et al., 2012). Avec le changement climatique combiné à la croissance économique, il est impératif que les pays adoptent les meilleures pratiques possibles dans l'exploitation et la gestion des ressources en eaux souterraines afin de satisfaire les besoins concurrentiels tout en tenant compte du rôle important que jouent les nappes souterraines dans la préservation des écosystèmes d'eaux douces (Tuinhof et al., 2011). Cette section donne un aperçu des ressources en eaux souterraines en Afrique subsaharienne ainsi que des possibilités et défis liés à l'emploi de cette importante ressource.

8.1.2 État des nappes souterraines

Les nappes souterraines constituent la principale source d'approvisionnement en eau dans une grande partie de l'Afrique et leur exploitation s'intensifie au fur et à mesure que la demande en eau saine augmente (MacDonald et al., 2021). En Afrique, les ressources en eaux souterraines sont souvent considérées comme susceptibles d'amorcer une transformation socio-économique d'envergure (Foster et al., 2012), de pallier la variabilité hydrologique actuelle (Grey et Sadoff, 2007) et de satisfaire les demandes à venir. Des études récentes appsellent au réveil du « géant endormi » que sont les nappes souterraines (Cobbing et Hiller, 2019) à travers une utilisation accrue des nappes peu profondes pour l'irrigation (Gowing et al., 2020) et leur exploitation, grâce à l'énergie solaire, aux fins de l'irrigation et du développement des réseaux de distribution d'eau courante (Wu et al., 2017 ; Gaye et Tindimugaya, 2019).

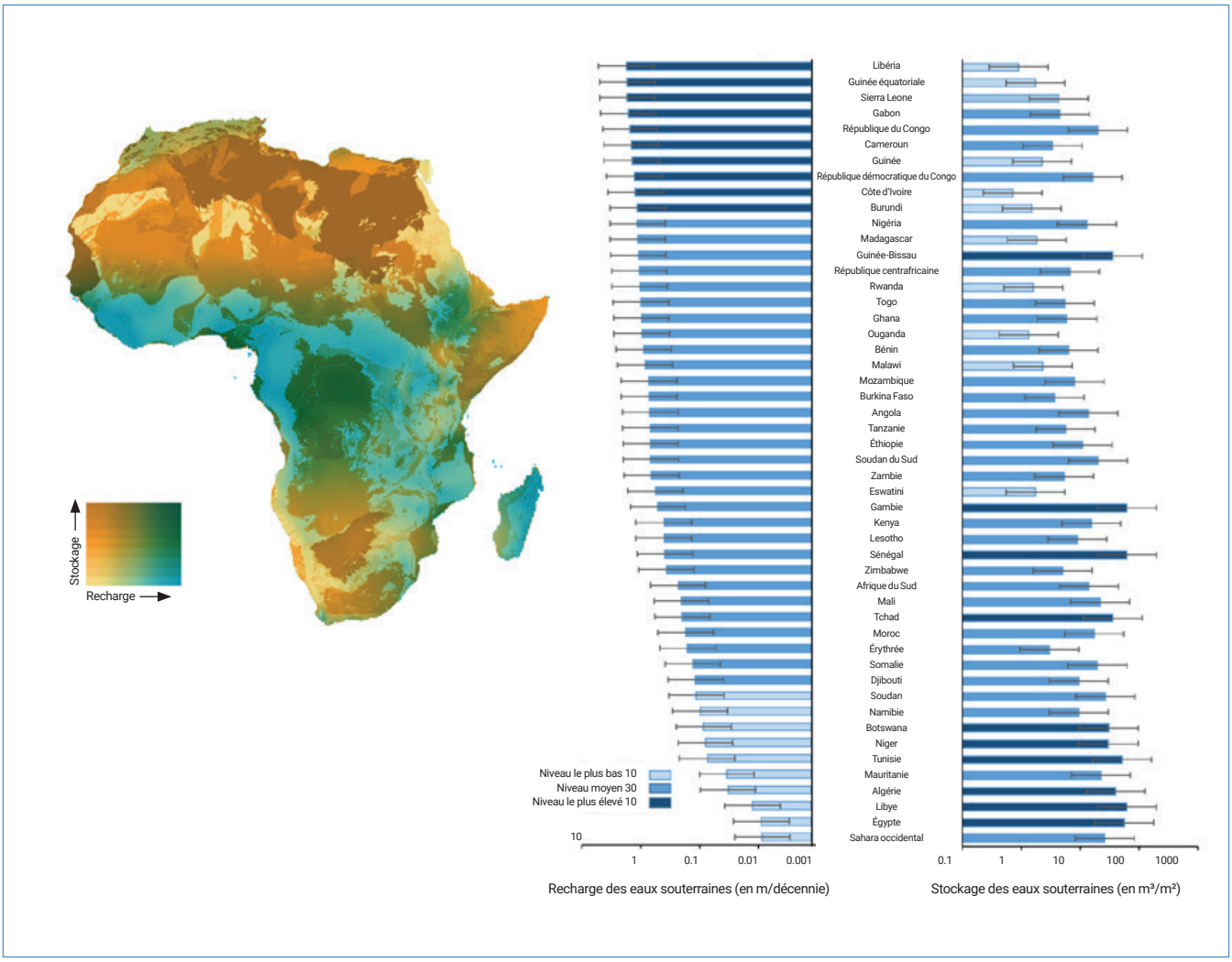
La promesse que représentent les eaux souterraines n'est pas qu'utopique. Des enquêtes hydrogéologiques approfondies, menées à travers le continent, révèlent que l'Afrique possède d'importantes ressources en eaux souterraines. MacDonald et al. (2012), qui ont réalisé la première carte quantitative des nappes souterraines en Afrique, ont estimé que la réserve totale d'eaux souterraines en Afrique est de 0,66 million km³ (0,36 à 1,75 million km³). Bien que ces réserves ne soient pas toutes exploitables, on estime que leur volume est cent fois supérieur à celui du renouvellement annuel des ressources en eau douce de la région (MacDonald et al., 2012). En ce qui concerne le changement climatique, Cuthbert et al. (2019a) ont conclu, de façon intéressante, que les évolutions climatiques futures pourraient affecter

l'approvisionnement en eaux de surface en Afrique sans toutefois provoquer la diminution des nappes souterraines, en raison du fait que leur recharge est tributaire de précipitations intenses, qui devraient augmenter à l'avenir. Ce pourquoi les eaux souterraines devraient être de plus en plus utilisées comme source d'approvisionnement en eau fiable partout en Afrique (Giordano, 2009 ; MacDonald et Calow, 2009). Toutefois, les disparités de recharge, de stockage et de perméabilité des aquifères détermineront quelles sous-régions pourront tirer le meilleur parti des eaux souterraines. Le stockage et la recharge des aquifères déterminent la résilience des systèmes de nappes souterraines au changement climatique et déterminent, de ce fait, la sécurité future de l'approvisionnement en eau. Selon MacDonald et al. (2021, figure 8.1, p. 10 à 11), « la plupart des pays africains qui disposent de faibles réserves d'eaux souterraines bénéficient de précipitations annuelles élevées et, partant, d'une recharge régulière. En revanche, de nombreux pays africains qui connaissent de faibles précipitations et sont généralement considérés comme en situation d'insécurité hydrique disposent de réserves considérables d'eaux souterraines, dont la plupart ont été stockées il y a des millénaires. […] Plusieurs pays, notamment (mais pas uniquement) en Afrique du Nord, jouissent d'une sécurité de l'eau considérable lorsque les réserves d'eaux souterraines sont prises en compte. Ces réserves permettent d'amortir les effets des extractions sur le système régional de nappes souterraines ». Toutefois, le pompage actuel de ces eaux souterraines se fera aux dépens des générations futures. Il convient donc de ne pas négliger les aspects économiques, financiers et environnementaux de l'épuisement des réserves. Le stockage des eaux souterraines en Afrique de l'Ouest et en Afrique centrale est généralement faible (figure 8.1). Dans ces sous-régions, les réserves d'eaux souterraines sont régulièrement rechargées et constituent une source d'approvisionnement fiable, bien que la limitation de la capacité de stockage puisse exposer les pays de cette zone à des périodes de sécheresse prolongées.

L'exploitation du potentiel des nappes souterraines, en vue d'engendrer des retombées positives pour la subsistance des populations, fait face à de nombreux défis géophysiques comme à des défis en matière de gouvernance aux niveaux local et régional. La qualité des eaux souterraines constitue l'un de ces défis hydrogéologiques. Par nature, la plupart des nappes souterraines sont remplies d'eau douce ou d'eau saumâtre. Toutefois, un grand nombre d'aquifères en zones arides et semi-arides, ainsi que dans les plaines côtières, subissent les effets de contaminants géogènes tels la salinité et le fluorure (Idowu et Lasisi, 2020). Il s'agit notamment de l'intrusion d'eau salée dans les plaines côtières de l'Afrique du Nord qui s'étendent de l'Égypte à la Tunisie. Les eaux souterraines dans le Grand Rift est-africain contiennent souvent de fortes concentrations de fluorure : une étude menée en Éthiopie a révélé que plus de 40 % des forages situés dans la partie éthiopienne de la vallée du Grand Rift en ont des concentrations supérieures aux limites prescrites dans les directives de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) et constituent, par conséquent, un danger majeur pour la santé (Tekle-Haimanot et al., 2006).

La détérioration anthropique de la qualité des eaux souterraines est également en hausse, en raison de facteurs tels que les activités minières (en Afrique du Sud par exemple), les mauvaises pratiques d'irrigation (dans la vallée du Nil et le bassin du fleuve Sénégal par exemple) et l'urbanisation (à Nairobi, à Accra, à Maputo par exemple) (Lapworth et al., 2017). Une étude récente menée en Éthiopie, au Malawi et en Ouganda révèle que près de 20 % des puits n'entrent pas dans les normes de l'OMS en matière de qualité bactériologique (Lapworth et al., 2020). Les problèmes de qualité des eaux souterraines pourraient être aggravés par le changement climatique et l'élévation du niveau de la mer, entraînant une augmentation de la salinisation des systèmes de nappes souterraines suite à la concentration par évaporation ou l'intrusion d'eau de mer. La recharge provenant d'intenses précipitations pourrait également favoriser la contamination bactériologique. Du fait d'une constitution géologique très diverse, les zones côtières de l'Afrique, longues de 40 000 km, sont composées d'une multitude de systèmes aquifères (Steyl et Dennis, 2010) dans lesquels l'intrusion d'eau salée diffère considérablement. Les intrusions causées par la surexploitation des aquifères côtiers ont entraîné une augmentation de la salinité dans un certain nombre de pays, dont l'Égypte, le Kenya, la Libye, la Tanzanie et la Tunisie, entre autres.

Figure 8.1 Résilience des nappes souterraines au changement climatique : des réserves importantes d'eaux souterraines produisent un effet tampon contre les variations, à court terme, des précipitations et une recharge moyenne élevée des nappes permet, sur le long terme, à un aquifère de se reconstituer rapidement après une sécheresse.



Source : MacDonald et al. (2021, fig. 4, p. 7). Contient des documents du Service géologique britannique © UKRI 2021. Sous la licence CC BY 3.0 IGO.

8.1.3 Disponibilité et utilisation des ressources en eaux souterraines pour l'irrigation

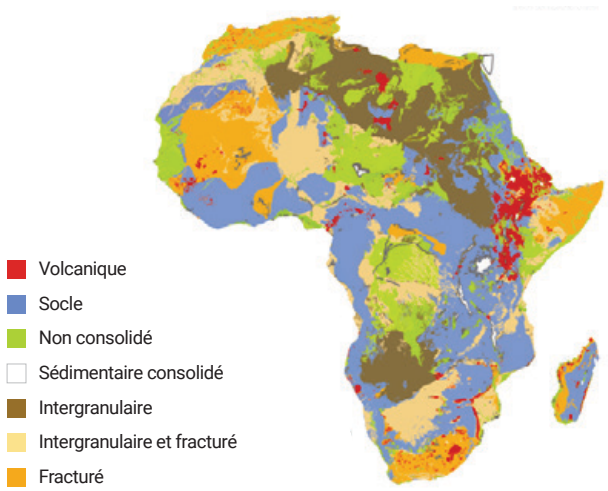
La majeure partie de la zone subsaharienne s'étend au-dessus de quatre grandes catégories d'aquifères, qui sont représentés dans la figure 8.2 (MacDonald et al., 2012) :

1. *Aquifères de roches volcaniques* – aquifères complexes multicouches qui se trouvent sous une majeure partie de la Corne de l'Afrique, avec des rendements variables où les eaux souterraines apparaissent généralement dans les fractures ;
2. *Aquifère de socle cristallin altéré* – aquifère peu profond étendu mais épars, avec un rendement de forage faible d'environ 1 l/s et une faible capacité de stockage ;
3. *Aquifères avec des formations meubles majeures et dépôts alluviaux mineurs* – aquifères non consolidés et peu profonds fournissant un rendement moyen et ayant des taux de recharge souvent favorables en raison de leur connexion avec les rivières ;
4. *Aquifères de roches sédimentaires consolidées* – aquifères plus épais à recharge variable mais offrant des possibilités de rendements plus élevés avec des coûts de forage plus élevés.

L'utilisation actuelle des eaux souterraines pour l'irrigation est limitée, en partie à cause des coûts d'exploration et d'exploitation des aquifères ainsi que des difficultés de financement. Selon Siebert et al. (2010), seuls 3 à 5 % de la surface totale des terres cultivées en Afrique subsaharienne sont irriguées, l'essentiel en étant concentré dans trois pays : Madagascar, l'Afrique du Sud et le Soudan. L'agriculture est pourtant le principal moyen de subsistance de nombreuses personnes. La part du secteur agricole est d'environ 30 % dans le produit intérieur brut (PIB) de l'Afrique subsaharienne bien que ce secteur emploie près de 65 % de la population, dont une majorité de femmes (Banque mondiale, 2018a), alors même que le continent pratique une agriculture essentiellement pluviale. Compte tenu de l'importance du secteur agricole sur le continent, toute amélioration afférente est l'occasion de transformer les conditions de vie de l'ensemble de la population. L'exploitation des nappes souterraines pourrait servir de catalyseur à la croissance économique en permettant d'augmenter la superficie des zones irriguées et, de ce fait, d'améliorer les rendements agricoles et la diversité des cultures pour, en fin de compte, transformer la chaîne de valeur tout entière (Schoengold et Zilberman, 2007).

Figure 8.2

Répartition des principaux types d'aquifères en Afrique



Source : MacDonald et al. (2012, fig. 4B, p. 6). Contient des documents du Service géologique britannique © UKRI 2012. Sous la licence CC BY 3.0 IGO.

8.1.4 Défis liés à l'exploitation des eaux souterraines

En dépit de l'énorme potentiel de l'exploitation des nappes souterraines dans la région subsaharienne, plusieurs facteurs entravent l'utilisation accrue de cette ressource. La plupart de ces obstacles sont communs à tous les pays. Le principal défi en matière de gouvernance est de surmonter l'inertie au sein de l'organisation institutionnelle. Avant la dernière décennie, les eaux souterraines suscitaient peu d'intérêt chez les décideurs politiques. On peut citer par exemple le cas des pays d'Asie du Sud-Est, qui ont exploité, dans les années 1970 et 1980, leurs ressources en eaux souterraines afin de transformer leur agriculture alors qu'aucun effort de ce type n'a été réalisé en Afrique. Le continent est également passé à côté de nombreuses autres évolutions mondiales déterminantes en matière d'exploitation des nappes souterraines. Dans le monde entier, de nombreux pays ont commencé, dans les années 1980, à constituer des bases de données sur les nappes souterraines et à dresser des cartes hydrogéologiques, mais ces initiatives se font encore rares en Afrique. Seuls quelques pays pratiquent la surveillance régulière des niveaux ou de la qualité des nappes souterraines, ce qui constitue pourtant la première étape de la gestion de celles-ci (IGRAC, 2020). Peu d'universités proposent des programmes d'étude sur les eaux souterraines et il existe peu d'organismes professionnels pour les hydrogéologues ou les foreurs. Le partage des données et des informations en est encore à ses débuts, malgré la croissance rapide et la disponibilité d'outils de collecte de données. Les cadres réglementaires visant à protéger et préserver les nappes souterraines au niveau national sont restreints ou ne sont pas mis en application. Il

existe toutefois des raisons de croire que le sujet des eaux souterraines commence à être pris davantage au sérieux, probablement en raison de la prise de conscience du fait que celles-ci ont un rôle majeur à jouer dans la réalisation des objectifs d'approvisionnement en eau. Récemment, plusieurs initiatives à l'échelle continentale, régionale et nationale ont été lancées. On peut citer, par exemple, l'Institut de gestion des eaux souterraines de la Communauté de développement de l'Afrique australe (SADC) ainsi que la Commission des eaux souterraines et son programme sur les eaux souterraines au sein du Conseil des ministres africains de l'eau (AMCOW).

Le financement demeure le principal obstacle à la mise en valeur des ressources en eaux souterraines. L'écart entre les dépenses actuelles et ce qu'il est nécessaire d'investir pour atteindre l'objectif de développement durable 6 est le plus élevé pour l'Afrique subsaharienne, où la réalisation d'un approvisionnement en eau universel nécessiterait dix fois plus d'investissements que le niveau actuel, qui est de l'ordre de 13,2 milliards de dollars US (Watts et al., 2021). Une part importante de ce montant est allouée au fonctionnement, à la maintenance et à la réhabilitation des systèmes existants, qui ne parviennent pas toujours à attirer des investisseurs.

Il est difficile de trouver du personnel qualifié disposant des compétences nécessaires pour mener des études hydrogéologiques et géophysiques

Il est difficile de trouver du personnel qualifié disposant des compétences nécessaires pour mener des études hydrogéologiques et géophysiques. De ce fait, les travaux sont souvent effectués par du personnel semi-qualifié, ce qui donne lieu à des constructions de mauvaise qualité ou des puits de forage qui ne sont pas réalisés à l'endroit propice, créant des problèmes de fonctionnement à long terme. Pour l'implantation et la construction des puits de forage à rendement élevé nécessaires à l'irrigation à grande échelle ou à l'approvisionnement en eau des villes, l'environnement hydrogéologique complexe que l'on trouve dans une grande partie du continent exige une grande expertise, laquelle reste difficile à trouver. Dans de nombreux pays, le manque d'experts dans le domaine des eaux souterraines se répercute sur les effectifs des institutions et des administrations locales et nationales, ce qui entrave les initiatives émergentes visant à superviser efficacement la surveillance, la planification et l'exploitation des eaux souterraines.

La nature de ces ressources peut également représenter un défi à leur exploitation. Une grande partie du sous-sol du continent est constitué d'aquifères de roches cristallines, ce qui limite généralement les rendements des puits de forage à moins de 1 litre par seconde. Plusieurs pays en Afrique de l'Est se situent au-dessus d'aquifères de roches volcaniques, qui ont un stockage limité et des voies d'écoulement complexes (figure 8.2). Les grands aquifères sédimentaires d'Afrique du Nord sont généralement situés loin des lieux où l'on a besoin d'eau. La qualité des eaux souterraines dans le Grand Rift est-africain peut constituer un défi en raison des niveaux élevés de fluorure qu'on y trouve. La contamination anthropique en zones urbaines est souvent aggravée par un mauvais assainissement. On n'a pas encore constaté de contamination à grande échelle provoquée par les nitrates ou les pesticides, bien que les schémas observés dans d'autres parties du monde, du fait de l'intensification des pratiques agricoles, s'y appliqueront peut-être également. Et si le traitement des eaux souterraines est généralement moins onéreux que celui des eaux de surface, il est probable que ce coût augmente.

8.1.5 Études de cas et pratiques exemplaires

En Afrique subsaharienne, on trouve de nombreux exemples d'exploitation des nappes souterraines. L'encadré 8.1 met en exergue le cas du Cap où différentes mesures ont été prises afin de garantir une continuité de distribution de l'eau du robinet. Historiquement, le Cap a toujours dépendu de sources de surface pour satisfaire ses besoins en eau. Cependant, la croissance démographique, couplée au changement climatique, a provoqué une pénurie d'eau qui a pu être résolue partiellement grâce aux nappes souterraines.

Encadré 8.1 La crise d'approvisionnement en eau dans la ville du Cap

Le Cap est la deuxième plus grande ville d'Afrique du Sud, avec une population d'environ 3,7 millions d'habitants. Six réservoirs, situés dans les montagnes autour de la ville, fournissent la majeure partie de l'eau, stockant environ 900 millions de m³ au total. Au début de l'année 2015, une grave sécheresse a considérablement réduit la quantité d'eau stockée dans ces réservoirs. Sans les pluies abondantes enregistrées en 2018, la ville aurait pu faire face à un « jour zéro », c'est-à-dire un moment où les réserves s'étant asséchées, elle n'aurait plus été approvisionnée en eau.

Le Cap a fait face à la crise de plusieurs manières. Des fuites présentes dans le système de distribution ont été réduites à environ 17 %, soit la moitié de la moyenne nationale. Des campagnes et des restrictions ont permis de réduire de moitié l'utilisation totale d'eau dans la ville, soit à environ 200 millions de m³/an. Des usines temporaires de dessalement et le recours d'urgence aux nappes souterraines ont contribué à accroître l'approvisionnement (avec 6 et 55 millions m³/an respectivement). Des forages indépendants ont été réalisés près des établissements scolaires, des hôpitaux et d'autres endroits importants afin de réduire leur vulnérabilité.

Source : adapté de la Banque mondiale (2018a, encadré 6, p. 34).

En 1990, le Conseil municipal de Nairobi a fermé les puits servant à approvisionner la ville lorsque l'approvisionnement en eaux de surface provenant du fleuve Tana (d'une capacité de 520 millions de l/jour) a été mis en service. Cependant, en 2002, en raison d'une défaillance des conduites d'alimentation (causée par un glissement de terrain), associée à la persistance de fortes fuites sur le réseau et à des pertes financières des services de distribution, la disponibilité de l'eau fut réduite à moins de 200 millions de l/jour, ne pouvant plus satisfaire les demandes de la ville. De nombreux forages furent alors réalisés et la capacité augmenta jusqu'à environ 300 millions de l/jour. Ainsi, ces forages (principalement) privés réussirent à atténuer cette crise d'approvisionnement en eau (Tuinhof et al., 2011).

La gestion de la recharge des aquifères (MAR) fait partie des outils utilisés dans la région. Il s'agit ainsi de modifier le paysage ou de développer des infrastructures afin d'améliorer l'infiltration de l'eau dans les sols et l'utiliser pendant les périodes de sécheresse (voir encadré 7.1 et section 11.5). Cette technologie a été adoptée à Windhoek (voir encadré 8.2).

Encadré 8.2 Le programme de gestion de la recharge des aquifères (MAR) de Windhoek

Les précipitations annuelles enregistrées à Windhoek, la capitale de la Namibie, s'élèvent à 360 mm et en font l'une des capitales les plus sèches au monde. Au début des années 1990, les sources d'eau de Windhoek (trois barrages et un champ de captage d'eaux souterraines) commencèrent à rencontrer des difficultés pour satisfaire la demande croissante. Des études montrèrent alors que de nouvelles sources d'eau, telle l'eau de mer dessalée qui devrait être pompée à partir de la côte, étaient trop éloignées et nécessiteraient beaucoup d'investissements financiers pour être opérationnelles.

Les urbanistes ont alors conçu un ensemble de solutions innovantes : lors des périodes d'excédents, les eaux traitées seraient stockées dans les aquifères du sous-sol afin de ne pas subir d'évaporation et être utilisées en période de pénurie. Windhoek a également commencé à réutiliser une partie de ses eaux usées en les traitant, selon les normes en vigueur pour l'eau potable, grâce à une nouvelle usine de traitement. Entre autres stratégies adoptées, la gestion de la demande consistait à identifier les fuites, à restreindre l'arrosage des jardins et à sensibiliser davantage le public. Par la suite, Windhoek a mis en service un système d'approvisionnement à « double conduite » dans certains quartiers : des eaux usées partiellement purifiées, en provenance d'une ancienne usine de traitement des eaux, étaient distribuées sur les terrains de sport, dans les parcs et les cimetières pour l'irrigation afin d'économiser davantage d'eau potable. Le programme MAR de Windhoek et d'autres mesures de gestion de l'eau se sont avérés beaucoup moins coûteux que d'autres solutions d'approvisionnement, faisant ainsi de Windhoek un leader mondial en matière d'utilisation durable de l'eau recyclée et de MAR.

Source : adapté de la Banque mondiale (2018a, encadré 7, p. 36).

8.1.6 Opportunités et réponses de la région

Il apparaît clairement qu'en Afrique subsaharienne, il existe des opportunités d'exploitation accrues des ressources en eaux souterraines dans le but de répondre à l'augmentation de la demande induite par la croissance démographique et économique, l'urbanisation rapide et la multiplication des besoins d'irrigation. Alors que le changement climatique continue d'influer sur les modes de précipitations, soumettant les ressources en eaux de surface à un plus grand stress hydrique, les nappes souterraines offrent une capacité tampon indispensable pour se protéger contre ces incertitudes et fournir un approvisionnement en eau plus fiable. L'utilisation combinée des eaux souterraines et des eaux de surface offre beaucoup de possibilités, le recours aux nappes souterraines en supplément des ressources en eaux de surface vient renforcer la résilience et la capacité d'approvisionnement, en particulier dans des villes en pleine expansion (Jacobsen et al., 2013).

Actuellement, en Afrique subsaharienne, l'exploitation poussée des nappes souterraines n'est pas limitée par le manque d'eau mais bien plutôt par le manque d'investissements

Cependant, l'exploitation grandissante des nappes souterraines peut menacer les services écosystémiques que celles-ci fournissent par leur contribution aux débits de base des fleuves et aux écosystèmes aquatiques. Il a déjà été montré que le débit de base diminue à Nairobi, où les nappes souterraines ont largement été exploitées (Oiro et al., 2020) et que le déversement d'eaux souterraines provenant de mines abandonnées dans les rivières a provoqué de graves contaminations en Afrique du Sud (Ochieng et al., 2010). Les aquifères transfrontaliers exigent également une gestion particulière, mais dans bien des cas, ils favorisent un travail commun et une compréhension mutuelle plutôt que les conflits.

Actuellement, en Afrique subsaharienne, l'exploitation poussée des nappes souterraines n'est pas limitée par le manque d'eau mais bien plutôt par le manque d'investissements. Il est urgent de trouver des moyens appropriés pour mettre à profit le potentiel des nappes souterraines afin de contribuer au développement de moyens de subsistance plus durables et parvenir à une croissance équitable. Ceci implique d'investir dans les infrastructures, les institutions, la formation professionnelle et la connaissance de la ressource.

Les progrès technologiques (notamment dans l'observation terrestre, les énergies renouvelables et les méthodes de forage avancées) peuvent favoriser l'exploitation des eaux souterraines, mais ils doivent aller de pair avec l'émergence d'une forte communauté de professionnels dans le domaine des eaux souterraines afin de tirer les meilleurs résultats de ces technologies.

Par le passé, les investissements dans le secteur des eaux souterraines ont été considérés comme moins avantageux que ceux dans les systèmes d'approvisionnement en eaux de surface, étant donné que, dans le premier cas, une grande partie des infrastructures est invisible et jugée, de ce fait, plus sujette à la corruption. Toutefois, des études menées en Afrique subsaharienne ont montré que l'exploitation des nappes souterraines n'est pas particulièrement plus exposée à la corruption (Plummer, 2012). Des investissement pour promouvoir des normes de construction plus sûres et plus efficaces seront cependant nécessaires pour améliorer la fonctionnalité des points d'eau. Des investissements dans les institutions nécessaires à la gestion des eaux souterraines sont également requis pour s'assurer que les exploitations futures ne menacent pas la viabilité des ressources.

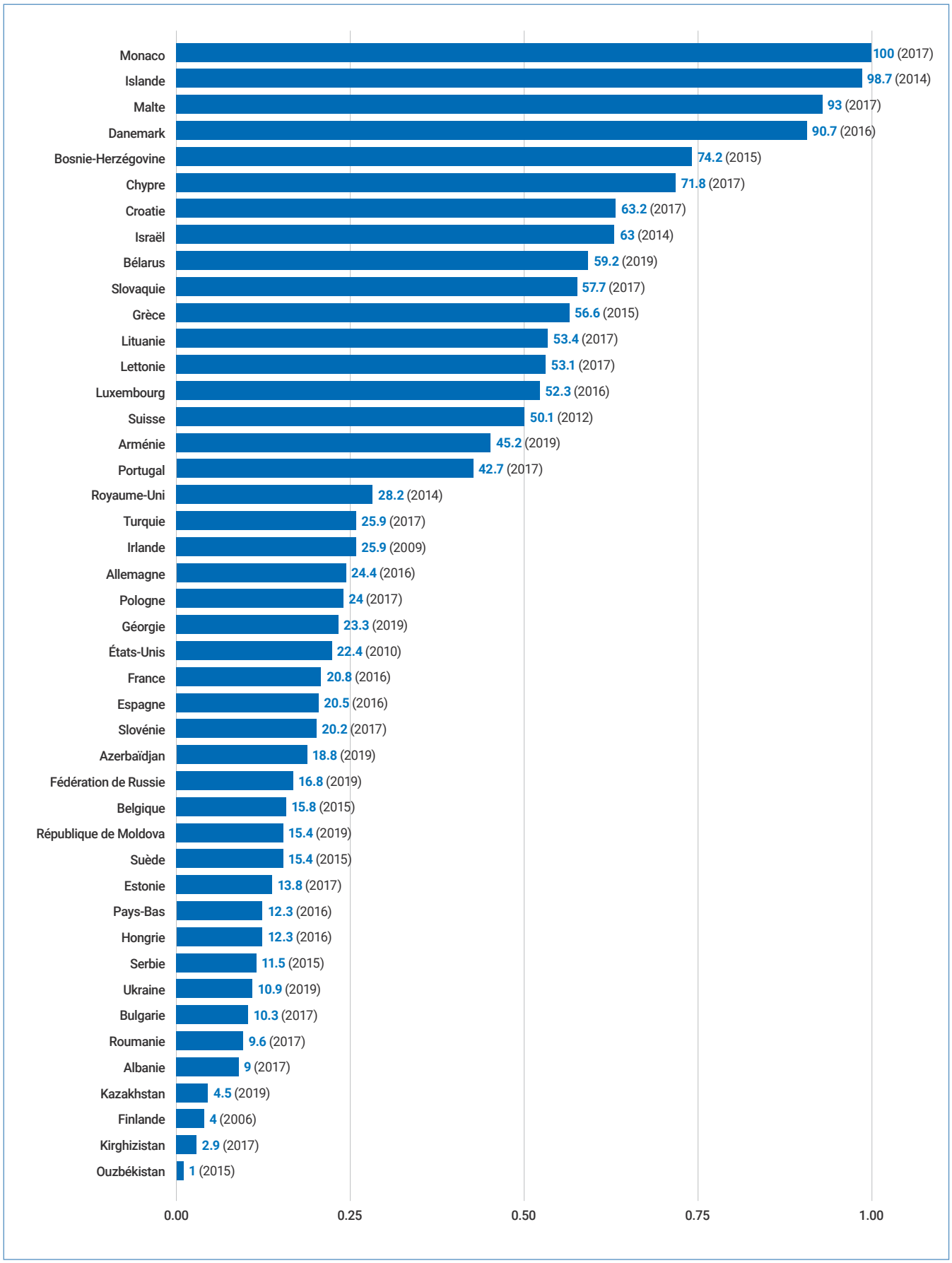
8.2 Europe et Amérique du Nord

Les caractéristiques des ressources en eaux souterraines et leur disponibilité varient entre l'Europe et l'Amérique du Nord et au sein même de ces deux régions, du fait de différences géologiques et hydrologiques (voir le Prologue, figure 6). Le présent chapitre décrit brièvement l'extraction des eaux souterraines dans les différentes régions, les particularités liées à la gouvernance de chacune d'elles et quelques problèmes urgents, propres aux eaux souterraines (la pollution par exemple)

8.2.1 Extraction et utilisation des ressources en eaux souterraines

En Europe et en Amérique du Nord, la part des eaux souterraines dans le prélèvement total d'eau douce varie beaucoup d'un pays à un autre, allant de 1 à 100% (voir figure 8.3).

Figure 8.3 Prélèvements d'eaux douces souterraines, exprimés en pourcentage de la quantité totale (brute) d'eau douce prélevée dans certains pays (dernière année disponible)



Source : La Division de la statistique sur la base des données d'Eurostat, de l'OCDE et du questionnaire sur l'environnement de la Division de la statistique.

En 2017, 24 % de l'extraction totale d'eau dans la zone composée de l'Union européenne (UE), de l'Islande, du Liechtenstein, de la Norvège, de la Suisse et de la Turquie provenaient des nappes souterraines (AEE, 2019). Les eaux souterraines constituent une importante source d'eau pour les foyers : quelque 75 % des habitants de l'Union européenne dépendent, pour leur approvisionnement en eau, des nappes souterraines (Commission européenne, 2008) qui sont également importantes pour l'industrie et l'agriculture (irrigation).

Aux États-Unis, l'extraction des eaux douces souterraines a atteint, en 2015, un volume estimé à 311,5 millions de m³/jour, soit environ 8% de plus qu'en 2010 (Dieter et al., 2018) alors que la totalité des prélèvements d'eau douce est en baisse depuis 2005. Au Canada, 30,3 % de la population dépend des nappes souterraines pour des usages aux niveaux municipal, domestique et rural (Gouvernement du Canada, 2013).

8.2.2 Évolution de la gestion et de la gouvernance des eaux souterraines

Le tableau 8.1 donne un aperçu indicatif de certains aspects de l'intégration régionale de la gouvernance des nappes souterraines au sein des sous-régions examinées dans le présent chapitre.

Tableau 8.1 Quelques caractéristiques générales de la gouvernance des eaux souterraines dans chaque sous-région du point de vue de l'intégration régionale (à titre indicatif uniquement)

Sous-région	Union européenne (EU)	Europe de l'Est, Caucase et Asie centrale	Amérique du Nord
Niveau d'intégration régionale et cohérence des politiques de gouvernance des eaux souterraines	La Directive-Cadre sur l'eau (WFD) et la Directive sur la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration prévoient une intégration des politiques en matière d'eaux de surface et d'eaux souterraines. Leur harmonisation régionale et leur cohérence sont encouragées par la Stratégie commune de mise en œuvre, notamment par son Groupe de travail sur les eaux souterraines.	Historiquement, la région appliquait une approche commune, qui s'est diversifiée au fil du temps en fonction des pays. En général, les eaux souterraines relèvent d'autorités différentes de celles des eaux de surface. Des emprunts sont faits à la Directive-Cadre sur l'eau (masses d'eaux souterraines, etc.) du fait du voisinage avec l'UE.	Décentralisation : Les États (fédéraux) (États-Unis d'Amérique) et les provinces et territoires (Canada) jouent un rôle clé dans la gestion des eaux souterraines. Il existe des différences significatives entre les politiques des États américains, notamment en ce qui concerne les liens de celles-ci avec les eaux de surface.

Les objectifs environnementaux de la Directive-Cadre sur l'eau (DCE) de l'UE, qui fournit, depuis l'an 2000, un cadre juridique régional pour les politiques de l'eau, contraignent les États membres de l'UE à prévenir la détérioration du bon état des masses d'eau et à protéger, à améliorer et à restaurer le bon état des eaux souterraines, en prenant en considération les états quantitatif et chimique (voir encadré 8.3).

La Directive-Cadre sur l'eau de l'UE a contribué à harmoniser les méthodes de délimitation et d'évaluation des masses d'eaux souterraines

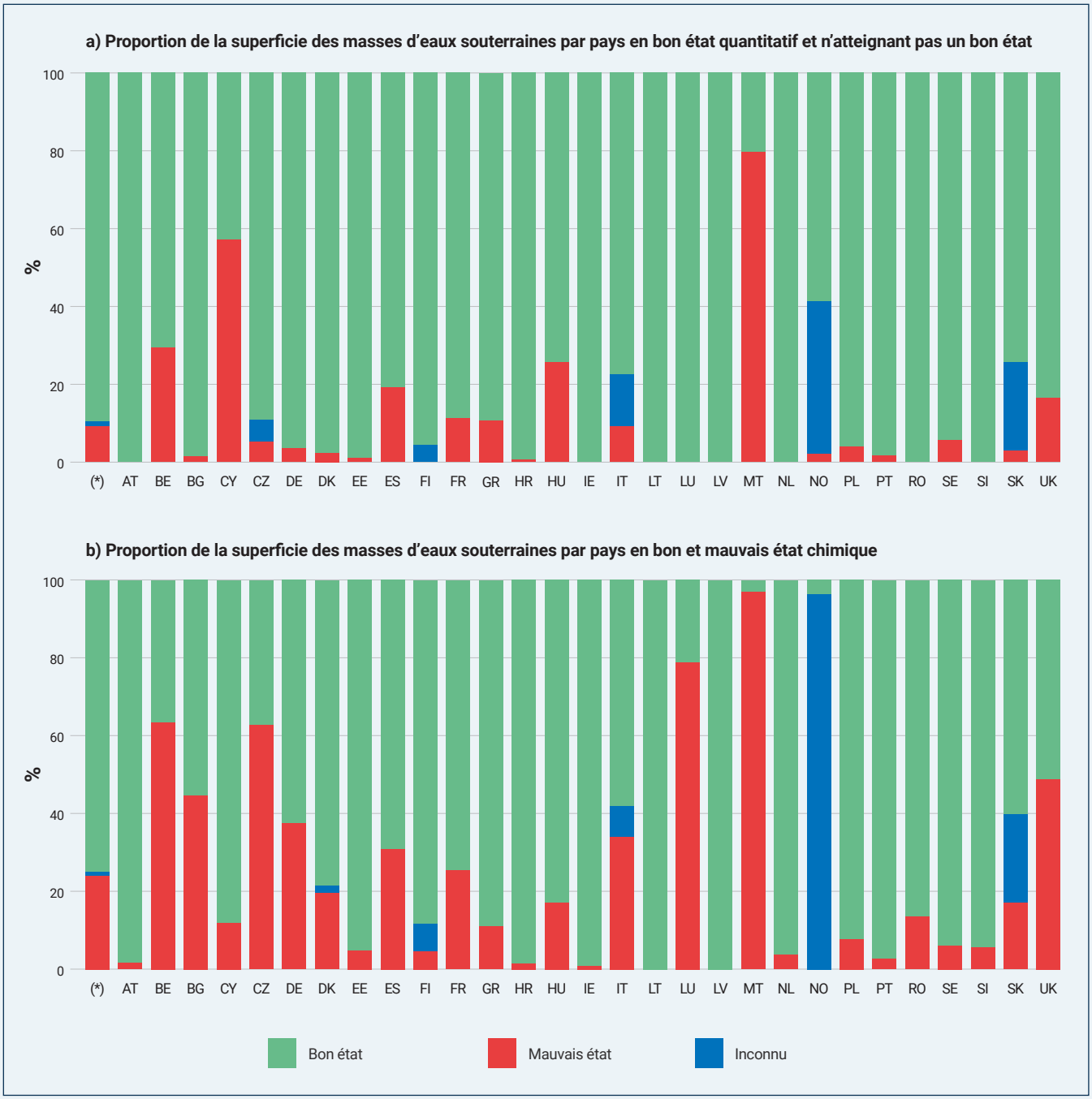
La Directive-Cadre sur l'eau exige l'identification et la caractérisation des masses d'eaux souterraines et, en association avec les données de surveillance, l'évaluation des impacts du stress hydrique causé par les humains sur les eaux souterraines. Cette directive répond également aux risques posés par une ignorance des objectifs environnementaux et établit des mesures nécessaires pour assurer et maintenir un bon état quantitatif et chimique. La Directive-Cadre sur l'eau de l'UE a contribué à harmoniser les méthodes de délimitation et d'évaluation des masses d'eaux souterraines, au sein comme aux environs de cette région (voir encadré 8.4).

Dans certains pays d'Europe de l'Est, le Caucase et l'Asie centrale, le principe d'une gestion intégrée des eaux de surface et des eaux souterraines était, jusqu'à récemment, absent des lois sur l'eau. Une meilleure protection était nécessaire étant donné que, par exemple, les permis d'extraction n'étaient pas suffisamment utilisés et contrôlés (CEE-ONU, 2011). Dans nombre de ces pays, la surveillance et l'évaluation des nappes souterraines se sont dégradées après la dislocation de l'Union soviétique, même si certains pays maintiennent une solide tradition scientifique et technique. La Géorgie en est une illustration : de 1990 à 2013, il n'y a eu aucunes

Encadré 8.3 État quantitatif et état chimique des masses d'eaux souterraines au sein de l'Union européenne

Au cours du deuxième cycle des plans de gestion des districts hydrographiques (2016 à 2021) au sein de l'UE, l'état des masses d'eaux souterraines a été évalué (AEE, 2018a ; voir la figure ci-dessous), ce qui a révélé que 74 % de masses d'eaux souterraines (unité de gestion) disposaient d'un bon état chimique tandis que 89 % d'entre elles disposaient d'un bon état quantitatif (AEE, 2019). Pour disposer d'un bon état quantitatif, la ressource en eau souterraine disponible ne doit pas avoir été réduite par extraction mais également, entre autres, ne pas mettre en péril les eaux de surface liées ou les écosystèmes terrestres dépendant de celle-ci.

États quantitatif et chimique des masses d'eaux souterraines



Note : * (Moyenne régionale), AT (Autriche), BE (Belgique), BG (Bulgarie), CY (Chypre), CZ (République tchèque), DE (Allemagne), DK (Danemark), EE (Estonie), ES (Espagne), FI (Finlande), FR (France), GR (Grèce), HR (Croatie), HU (Hongrie), IE (Irlande), IT (Italie), LT (Lituanie), LU (Luxembourg), LV (Lettonie), MT (Malte), NT (Pays-Bas), NO (Norvège), PL (Pologne), PT (Portugal), RO (Roumanie), SE (Suède), SI (Slovénie), SK (Slovaquie) et UK (Royaume-Uni).

Source : AEE (2018a), sur la base des données communiquées par les États membres de l'UE en réponse à la Directive-Cadre sur l'eau.

activités de surveillance centralisées mais depuis 2013, des stations de surveillance ont été mises en place ou réactivées de façon progressive avec le soutien de différents projets (EUWI+, 2020). Les changements politiques et administratifs fréquents ont souvent causé une certaine fragmentation, et la surveillance et l'évaluation des nappes souterraines restent généralement séparées de la gestion globale de l'eau.

Aux États-Unis, la gouvernance des eaux souterraines a également connu d'importants changements. Il existe de grandes différences entre les cadres juridiques régissant les eaux souterraines dans chaque État, y compris dans la manière dont ceux-ci reflètent la connexion hydrologique entre les eaux de surface et les eaux souterraines (Megdal et al., 2014). La plupart des dispositifs juridiques portent soit sur la quantité, soit sur la qualité de l'eau, avec différents organismes publics en charge de chacune (Gerlak at al., 2013). En Californie, la loi relative à la gestion durable des eaux souterraines (Département des ressources en eau de Californie, 2014) a mis en place un cadre de gouvernance des eaux souterraines au niveau fédéral, qui a permis de créer des agences locales de protection de la durabilité des nappes souterraines. Ces organismes sont les premiers responsables de l'élaboration et de la mise en œuvre de contrôles réglementaires relatifs à la gestion de ces nappes (Kiparsky et al., 2017). Au Canada, la Constitution stipule que l'eau et les eaux souterraines dépendent juridiquement des provinces et des territoires sur lesquels elles se trouvent tandis que le Gouvernement fédéral a le pouvoir de gérer les nappes souterraines situées sur les territoires fédéraux, notamment les parcs nationaux (Rivera, 2014).

Les cadres juridiques et institutionnels de coopération transfrontières mis en place par les 42 pays partageant des eaux en Europe et en Amérique du Nord couvrent de plus en plus les aquifères

Les cadres juridiques et institutionnels de coopération transfrontières mis en place par les 42 pays partageant des eaux en Europe et en Amérique du Nord couvrent de plus en plus les aquifères. Parmi les 36 pays partageant des aquifères transfrontaliers dans la région, vingt-quatre ont signalé que les dispositions opérationnelles couvrent 70 % ou plus de leur zone aquifère transfrontalière (CEE-ONU/UNESCO, 2021). Les cadres institutionnels et juridiques, notamment la Convention sur la protection et l'utilisation des cours d'eau transfrontières et des lacs internationaux, ont renforcé la coopération dans la région (Lipponen et Chilton, 2018).

8.2.3 Défis et opportunités relatifs aux eaux souterraines

Trois facteurs, qui influent sur les ressources en eaux souterraines et par conséquent sur les utilisations et les activités socio-économiques qui en dépendent, ou pour lesquels les eaux souterraines font partie d'une résolution des problèmes que celles-ci posent, sont illustrés par des exemples ci-dessous : le changement climatique et les pénuries d'eau, les écosystèmes dépendant des eaux de surface et, enfin, la pollution, y compris les nouveaux polluants.

Encadré 8.4 La transition difficile entre l'évaluation hydrogéologique et la prise en compte du stress hydrique humain

L'Initiative de l'Union européenne pour l'eau relative aux pays du Partenariat oriental (EUWI+, 2016 à 2021) a aidé à la mise en œuvre des principes de gestion intégrée de la Directive-Cadre sur l'eau (DCE) relatifs aux eaux de surface et aux eaux souterraines, dans les pays du partenariat oriental (Arménie, Azerbaïdjan, Biélorussie, Géorgie, Moldavie et Ukraine). En ce qui concerne les eaux souterraines, il s'est avéré difficile de passer de l'approche traditionnelle antérieure, centrée sur les problèmes locaux particuliers et s'intéressant uniquement à la situation hydrogéologique et à l'état chimique des nappes, à une perspective plus holistique, consistant à délimiter des masses d'eaux souterraines (unités de gestion de la DCE) et à prendre en compte les stress hydriques pertinents, causés par les humains, ainsi que leurs impacts sur la quantité et la composition chimique des eaux souterraines. Avec le soutien d'EUWI+, un total de 117 masses d'eaux souterraines ont été délimitées (y compris 42 masses d'eau transfrontières). La coopération entre la Biélorussie et l'Ukraine, deux pays engagés dans des mesures pour mettre en application la DCE et identifier les masses d'eaux souterraines transfrontières (Lyuta et al., 2021), illustre ce processus et met l'accent sur la nécessité d'une harmonisation transfrontière.

Le changement climatique et les pénuries d'eau

Les États de la région doivent faire face aux stress hydriques que provoque l'extraction d'eau et qu'aggrave encore le changement climatique. À cet égard, les eaux souterraines constituent une ressource indispensable et offrent certaines solutions.

Pendant les mois d'été de l'année 2015, 33 % de la population de la zone couvrant l'Union européenne, le Liechtenstein, la Norvège et la Suisse ont été exposés à des problèmes de stress hydrique[25] (AEE, 2019). Les États membres de l'UE échangent des informations sur les bonnes pratiques pour faire face aux pressions qu'exerce l'extraction d'eau, en tenant compte du changement climatique. Un document d'orientation sur la MAR est en cours d'élaboration au sein de l'UE.

Les mesures prévues par le Gouvernement du Kazakhstan (2018) visent à réduire les pénuries d'eau, tant au niveau national qu'au niveau régional, à distribuer les ressources en eaux transfrontières, à utiliser les eaux souterraines de façon efficace et durable, à construire de nouvelles infrastructures, à accroître le couvert forestier des bassins versants et à permettre des rejets dans l'environnement.

Aux États-Unis, la baisse du niveau des nappes souterraines et la concurrence entre utilisateurs figurent parmi les principales priorités, en matière de gouvernance des nappes souterraines, que les responsables des agences publiques ont identifiées (de même que la qualité et la contamination de l'eau) (Megdal et al., 2014 ; Petersen-Perlman et al., 2018). La commercialisation de l'eau a été étudiée aux États-Unis comme un moyen d'inciter financièrement des détenteurs de droits sur les nappes souterraines à investir dans la conservation de l'eau afin de tirer profit des eaux non utilisées ou de leur transfert vers d'autres utilisateurs. En Arizona, la moindre disponibilité de l'eau a conduit à l'utilisation des effluents comme source alternative, tandis que des modifications législatives ont instauré des crédits de stockage négociables à long terme au travers de la recharge des aquifères à partir de l'eau ou des effluents du fleuve Colorado (Bernat et al., 2020).

Les écosystèmes dépendant des eaux souterraines

Au sein de l'UE, le cycle du Plan de gestion des districts hydrographiques, qui s'est achevé en 2021, montre que les liens entre les nappes souterraines, les écosystèmes aquatiques associés et les écosystèmes terrestres dépendant de ces nappes sont de plus en plus pris en considération par les États membres. Ceci permet de mieux identifier ces écosystèmes, de tenir davantage compte des aspects quantitatifs et qualitatifs, et de continuer à établir des valeurs seuils appropriées pour les nappes souterraines qui correspondent aux besoins des écosystèmes. Les progrès sont permis grâce aux rapports techniques (voir Commission européenne, 2011, 2014a, 2015).

La MAR fournit des moyens de tirer parti du stockage souterrain en aquifères en fonction des débits variables (voir encadré 7.1 et section 11.5). Les organisations non gouvernementales (ONG) environnementales quantifient la recharge d'eau souterraine dans les aquifères locaux ainsi que les avantages écosystémiques et la réduction des risques d'inondation qu'elle présente, ce qui permet de créer des partenariats assortis de multiples bénéfices. En Californie, les agriculteurs peuvent recevoir une compensation financière pour la recharge des aquifères au début de l'automne, lorsque l'eau se fait particulièrement rare. Ces pratiques d'inondation contrôlée fournissent également des habitats humides temporaires, indispensables aux oiseaux de rivage qui migrent suivant la voie migratoire du Pacifique et qui n'ont souvent nulle part où s'arrêter au cours de leurs longues migrations (The Nature Conservancy, n.d.). Aux États-Unis, on a pu constater que les fonds investis

---

[25] Comme cela a été défini dans ce rapport, le « stress hydrique » survient lorsque le pourcentage d'utilisation de l'eau par rapport aux ressources en eau douce renouvelables à un moment et en un lieu donnés (dans cet exemple au niveau du bassin fluvial) est supérieur à 20 %.

dans l'eau ont permis de protéger les espaces verts au sein de communautés locales et aux environs, et d'améliorer, dans le cas de l'aquifère Edwards qui approvisionne la ville de San Antonio au Texas, la qualité de l'eau qui assure la recharge des aquifères (The Nature Conservancy, 2019).

La qualité des eaux souterraines, les polluants et les risques sur la santé

Les nitrates et les pesticides comptent parmi les polluants les plus fréquemment responsables d'une mauvaise qualité chimique des eaux souterraines au sein de l'UE. Toutefois, si les polluants d'origine agricole prédominent (et ce problème n'est pas l'apanage de l'Europe), les produits chimiques industriels et les substances liées à l'exploitation minière entraînent également une pollution chimique des eaux souterraines dans plusieurs bassins hydrographiques (voir figure 8.4 ; AEE, 2018b). Il devient donc indispensable de disposer de plus amples informations sur ces polluants « nouveaux » (ou « émergents ») dans les nappes souterraines. Une liste de surveillance pour les substances présentes dans les eaux souterraines est actuellement en train d'être établie conformément à la directive 2014/80/UE de l'UE (amendant la directive 2006/118/CE sur les eaux souterraines sous l'égide de la DCE) afin de « augmenter la disponibilité des données de contrôle concernant les substances qui présentent un risque, réel ou potentiel, pour les masses d'eaux souterraines et faciliter ainsi l'identification des substances, y compris les nouveaux polluants, pour lesquels il convient de fixer des normes de qualité ou des valeurs seuils relatives aux eaux souterraines » (Commission européenne, 2014b). Jusqu'à présent, les produits pharmaceutiques, les substances per- et polyfluoroalkylées et les métabolites de pesticides non pertinents ont été pris en considération.

Dans de nombreux pays d'Europe, les eaux souterraines sont la principale source d'eau potable, ce qui montre bien la nécessité de contrôler la qualité de l'eau au vu des risques sanitaires

Dans de nombreux pays d'Europe, les eaux souterraines sont la principale source d'eau potable, ce qui montre bien la nécessité de contrôler la qualité de l'eau au vu des risques sanitaires. De tels efforts sont soutenus par les comptes rendus concernant les cibles nationales qui ont été établies par les pays dans le cadre du Protocole sur l'eau et la santé soutenu par la CEE-ONU et l'OMS (CEE-ONU/OMS, 2019). Reflétant un problème plus largement émergent, les Pays-Bas ont signalé la gestion de nouvelles substances, tels les produits pharmaceutiques, les microplastiques et les nanoparticules au nombre des préoccupations ayant trait aux eaux souterraines ainsi qu'aux eaux de surface (OCDE, 2019a). Dans une étude menée aux États-Unis, au moins un composant hormonal ou pharmaceutique a été détecté dans 6 % des 844 sites où les nappes souterraines sont utilisées pour l'approvisionnement public, ce qui suggère que les aquifères étaient peu vulnérables à la contamination par ces composés (Bexfield et al., 2019). Cependant, certains de ces nouveaux polluants organiques et leurs métabolites peuvent constituer une menace pour les masses d'eaux souterraines, pendant peut-être même des décennies sous certaines conditions, en raison de longues périodes de résidence (Lapworth et al., 2012).

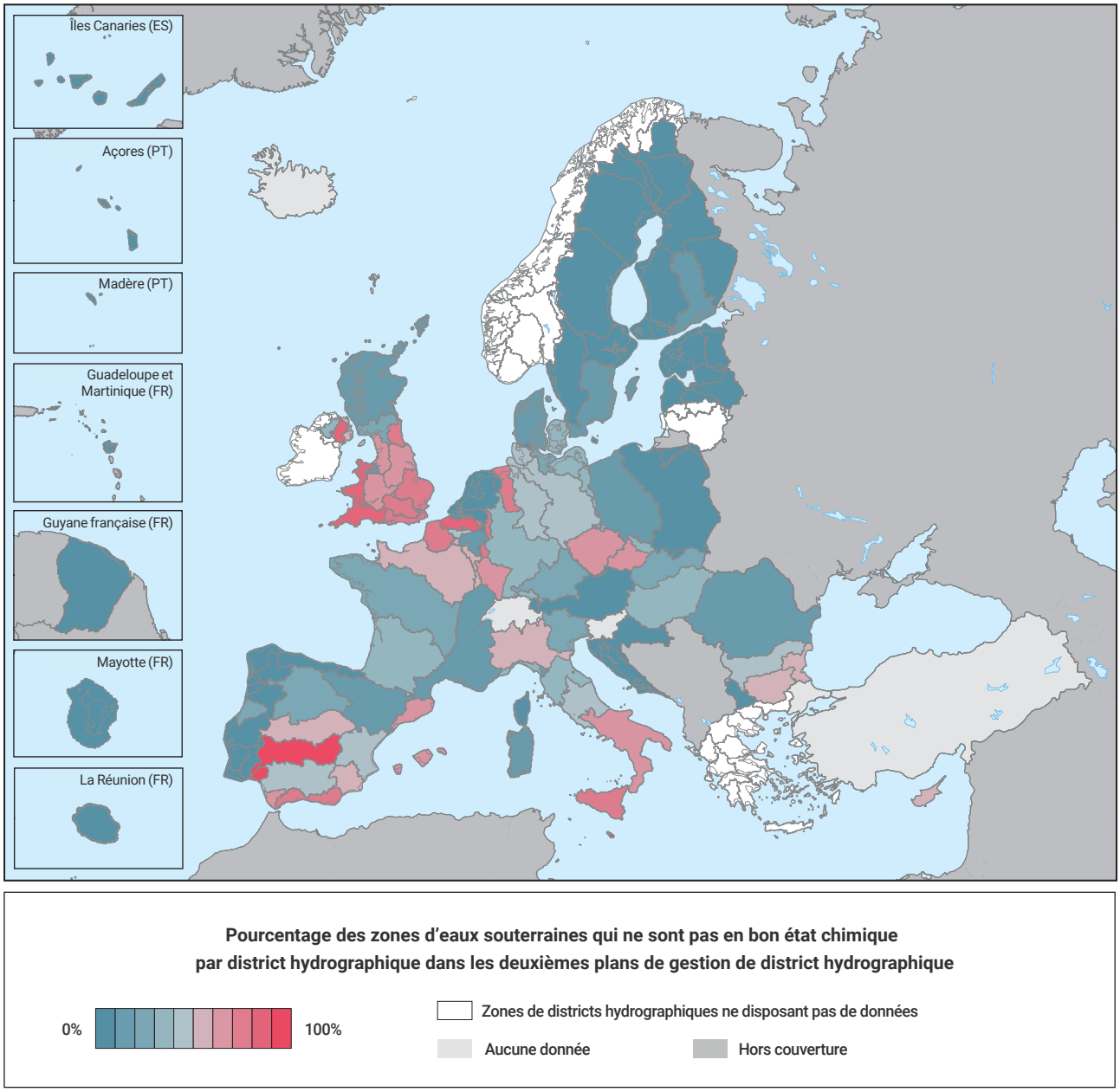
En Europe de l'Est et dans le Caucase, une portée limitée de la surveillance (des substances et/ou de la fréquence) et/ou la manière restrictive dont elle a été établie dans la législation entravent parfois l'application d'une méthode de surveillance qui soit à la fois fondée sur les risques et rentable (surveillance et suivi opérationnel)[26].

8.2.4 Réponses aux défis présentés par les eaux souterraines

Les différents systèmes juridiques et de gouvernance permettent de déployer différentes solutions au sein de l'Union européenne, de l'Europe orientale (Europe de l'Est, Caucase et Asie centrale) et en Amérique du Nord (voir tableau 8.2). Outre la nécessité d'une collaboration entre les différents utilisateurs de l'eau dans une région donnée, on reconnaît de plus en plus la nature transfrontière de nombreuses ressources en eaux souterraines et, par conséquent, la nécessité d'une coopération entre juridictions (voir chapitre 12).

[26] UBA (non publié).

Figure 8.4 Pourcentage de la superficie des nappes souterraines « en mauvais état chimique » par district hydrographique



Source : adapté de l'AEE (2018b, carte 4.1, p. 51).

Tableau 8.2 Quelques solutions en matière de gouvernance et/ou de gestion des défis liés aux eaux souterraines dans chaque sous-région (à titre indicatif)

Union européenne (EU)	Europe orientale, Caucase et Asie centrale	Amérique du Nord
Amélioration de l'état quantitatif et chimique des eaux souterraines au sein de l'objectif général du cadre des Plans de gestion de district hydrographique. Harmonisation des approches à travers l'UE. Amélioration de la cohérence des politiques (fondées sur des stratégies transversales tel le Plan d'action de l'UE « Vers une pollution zéro dans l'air, l'eau et les sols — construire une planète plus saine pour des populations plus saines »).	Mise en œuvre de solutions techniques pour les eaux souterraines (par exemple modernisation des infrastructures hydrauliques et renforcement de leur efficacité). Renforcement de la protection environnementale, y compris celle des ressources en eaux souterraines.	États-Unis : Mécanismes basés sur le marché et mesures incitatives. Marchés de l'eau, réaffectation des droits d'usage de l'eau ou des crédits de stockage. Partenariats entre les organisations de conservation et les secteurs économiques pour des projets à bénéfices multiples.

Tout comme pour leur quantité, les préoccupations relatives à la qualité des eaux souterraines sont primordiales. Les études et recherches menées dans la région ont révélé des problèmes de qualité des eaux souterraines, notamment en raison de nouveaux polluants. Afin d'assurer une surveillance rentable et durable à long terme, il est nécessaire d'établir certaines priorités pour trouver un équilibre entre une surveillance dont la couverture soit suffisante et une attention adéquate dévolue à certains polluants. De manière générale, la surveillance des eaux souterraines et l'expertise dans ce domaine relèvent d'institutions spécialisées tandis que la mise en œuvre des instruments des politiques hydrauliques (la DCE par exemple, tel qu'indiqué au tableau 8.1) nécessite une coopération entre institutions. En effet, les mêmes déterminants et facteurs agissent souvent aussi bien sur les eaux souterraines que sur les eaux de surface. Ce pourquoi des politiques intégrées et des mesures visant à assurer une cohérence sont en cours d'élaboration.

8.3 Amérique latine et Caraïbes

8.3.1 Introduction

En Amérique latine et dans les Caraïbes, les nappes souterraines constituent une source d'eau importante étant donné qu'elles déversent environ 3 700 km³/an d'eau dans les fleuves de la région (Campuzano et al., 2014). Ce volume équivaut à 10 200 m³ par habitant/an provenant des ressources renouvelables en eaux souterraines, soit un peu plus d'un tiers de la dotation moyenne en eau par habitant et par an dans la région. En outre, en raison de l'abondance relative des eaux de surface et du niveau limité d'utilisation des eaux souterraines, moins de 30 % de l'eau douce prélevée provient de sources souterraines. Dans les pays qui ont besoin des eaux souterraines, la moitié environ des extractions est utilisée pour l'irrigation, un tiers pour usage domestique et le reste pour une utilisation industrielle (Aguilar-Barajas et al., 2015). La dépendance vis-à-vis de l'approvisionnement à partir des nappes souterraines pourrait augmenter dans les années à venir, en raison de facteurs tels que la croissance démographique, l'urbanisation et le changement climatique.

Les nappes souterraines et le sous-sol qui les contient jouent un rôle important dans les systèmes d'approvisionnement en eau de la plupart des villes d'Amérique latine, et pas seulement dans celles où les eaux souterraines sont la principale source d'approvisionnement

Les eaux souterraines sont une ressource essentielle et stratégique dans les zones arides et semi-arides (Espindola et al., 2020 ; UNESCO, 2007). C'est notamment le cas dans le fameux Corridor sec d'Amérique centrale ainsi qu'à Mexico, pour ne citer que ces zones. Cependant, dans toute la région, on constate des faiblesses dans la protection et la surveillance des eaux souterraines, entraînant leur exploitation intensive et/ou leur contamination, ce qui compromet à terme leur durabilité (Campuzano et al., 2014) ainsi que leur accessibilité aux populations les plus vulnérables, dont l'approvisionnement en eau potable dépend de ces sources (WWAP, 2019). La figure 8.5 donne un aperçu des ressources en eaux souterraines et des niveaux de recharge dans la région.

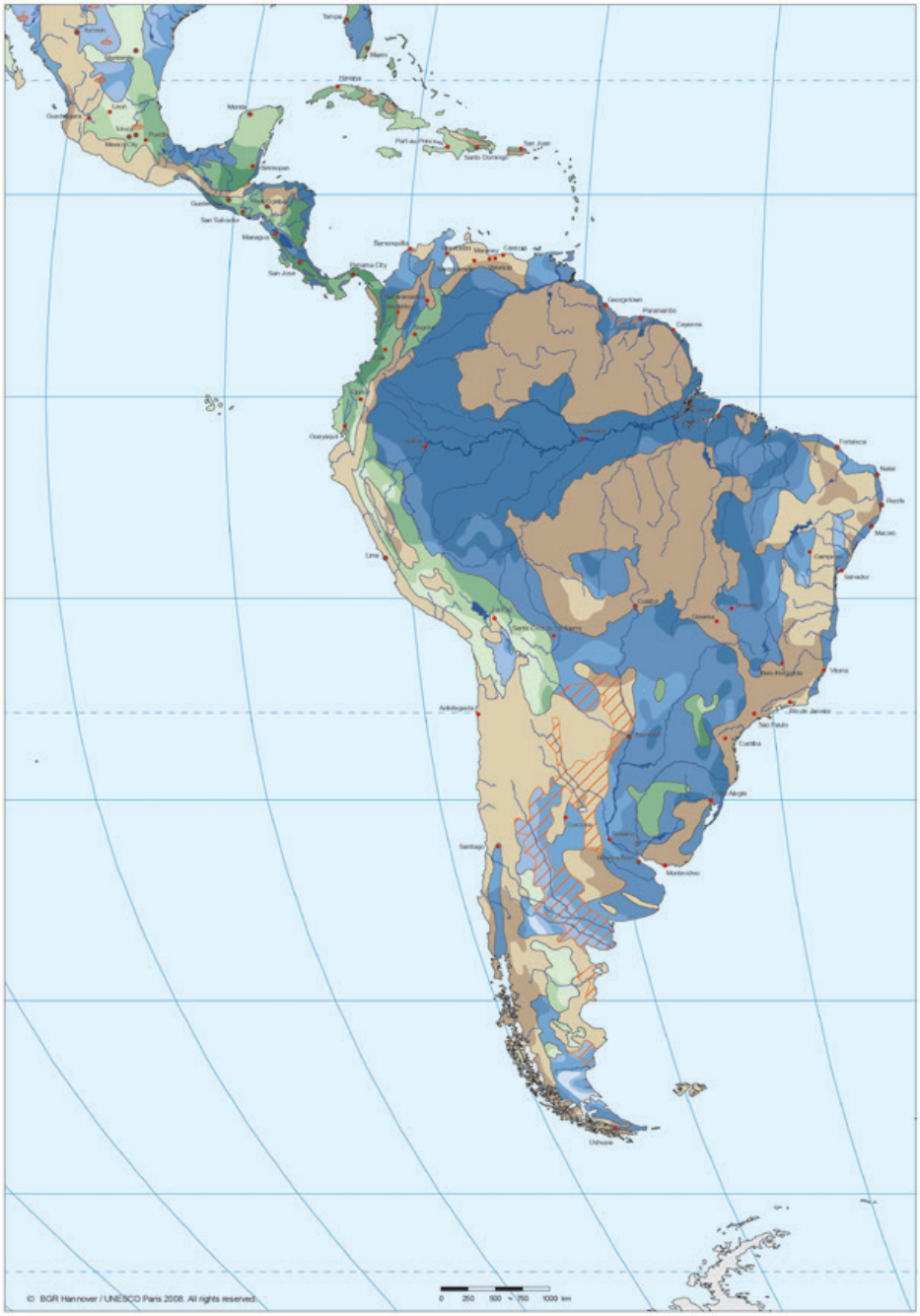
8.3.2 Les principales utilisations des eaux souterraines

Au nord et au centre du Mexique, au nord-est du Brésil, sur les côtes du Pérou et du Chili, et dans la zone pré-andine de l'Argentine, les eaux souterraines sont principalement utilisées pour l'irrigation des cultures dans les zones les plus arides (Foster and Garduño, 2009). Les nappes souterraines et le sous-sol qui les contient jouent un rôle important dans les systèmes d'approvisionnement en eau de la plupart des villes d'Amérique latine, et pas seulement dans celles où les eaux souterraines sont la principale source d'approvisionnement (voir León, Lima, Mexico, Natal, San José et São Paulo parmi d'autres[27]). Dans d'autres pays comme le Costa Rica et le Mexique, les eaux souterraines alimentent 70 % des foyers en zones urbaines et satisfont pratiquement toute la demande en eau domestique en zones rurales. Elles représentent également 50 % de l'eau utilisée par le secteur industriel (Campuzano et al., 2014). Dans d'autres pays, les aquifères sont à peine exploités en raison du manque d'informations les concernant ainsi que d'autres facteurs (UNESCO, 2007). En Amérique latine

[27] À Buenos Aires où l'utilisation des eaux souterraines a considérablement diminué en raison des « importations d'eaux de surface », des problèmes sanitaires et de drainage dans plusieurs grandes zones ont commencé à apparaître (Foster et Garduño, 2009).

Figure 8.5

Taux de recharge des principaux systèmes de nappes souterraines en Amérique latine et dans les Caraïbes



Recharge des nappes souterraine (mm/an)

Ressources en eaux souterraines	Très élevée 300	Élevée 100	Intermédiaire 20	Faible 2	Très faible 0
dans les principaux bassins hydrogéologiques					
dans les zones présentant une structure hydrogéologique complexe					
dans les zones dotées de nappes phréatiques locales et peu profondes					

Caractéristiques particulières des eaux souterraines

- zone d'eau souterraine salée (total des matières solides dissoutes >5 g/l)
- zone d'écoulement de nappes souterraines naturelles en régions arides
- zone d'extraction importante des eaux souterraines incluant la surexploitation
- exploitation minière des eaux souterraines

Eaux de surface et géographie

- Grand fleuve
- Grand lac d'eau douce
- Grand lac d'eau salée
- Couche de glace continue
- Ville

Source : BGR/UNESCO 2008

et dans les Caraïbes, l'industrie minière utilise également les eaux souterraines de manière intensive et se trouve en concurrence avec les secteurs agricole et domestique. Au Chili par exemple, 63 % de l'eau utilisée par le secteur minier provient de nappes souterraines. L'utilisation des eaux souterraines dans le secteur minier présente un risque important de pollution des aquifères, laquelle peut survenir si des fuites d'eaux usées viennent à se produire dans ces aquifères (Ruz et al., 2020).

8.3.3 Défis liés à la gestion des eaux souterraines

Plusieurs pays, dont certaines parties de l'Argentine, du Brésil, du Mexique, du Paraguay et du Pérou, sont confrontés à une surexploitation et une contamination graves de leurs nappes souterraines. Le Mexique a tenté de nombreuses approches[28] pour améliorer la gestion de ses aquifères surexploités (Arroyo et al., 2015). Dans la région, la qualité des eaux souterraines est le plus fréquemment affectée par la présence d'éléments indésirables d'origine naturelle (principalement l'arsenic et le fluor), de polluants anthropiques (nitrates, polluants fécaux, pesticides), de divers composés d'origine industrielle (sous-produits miniers, solvants organochlorés, hydrocarbures, composés phénoliques, etc.) et de polluants émergents, tels que les cosmétiques, les antibiotiques, les hormones et les nanomatériaux. En Bolivie par exemple, la qualité des eaux souterraines est menacée par la pollution industrielle, agricole et domestique, tandis qu'au Honduras, la forte demande en eau dans les zones urbaines constitue une menace pour la disponibilité de cette ressource à l'avenir (Ruz et al., 2020).

Les défis susmentionnés sont autant de raisons qui ont conduit à une augmentation du nombre de conflits liés à l'accès et à l'utilisation de l'eau dans la région. Ces conflits sont souvent liés à des décisions relatives à la gestion de l'eau entre différents utilisateurs, et/ou à l'accès aux terres[29], ou résultent des impacts des activités liées aux minerais et l'extraction des matériaux de construction, les combustibles fossiles, la justice climatique ou les projets relatifs aux énergies. On estime que le nombre de conflits liés à la pollution et à l'épuisement des nappes souterraines qui ont débuté entre 2000 et 2019 est quatre fois supérieur au nombre des conflits de ce type qui ont débuté entre 1980 et 1999 (ICTA-UAB, n.d.).

8.3.4 Défis propres aux petits États insulaires en développement (PEID) et autres zones côtières

Dans les Caraïbes, où les eaux de surface tendent à être relativement rares, les eaux souterraines représentent environ 50 % de l'eau prélevée. Des pays tels que les Bahamas, la Barbade et la Jamaïque dépendent fortement des ressources en eaux souterraines en tant que principale source d'approvisionnement. À la Barbade, les eaux souterraines représentent même jusqu'à 90 % de l'approvisionnement total en eau ; en Jamaïque, ce pourcentage est estimé à 84 % et à Saint-Kitts-et-Nevis, il est d'environ 70 %. Cependant, à la Grenade, à la Dominique et à Sainte-Lucie, les eaux souterraines sont très peu utilisées, ce qui montre une véritable variabilité au sein des Caraïbes. La surexploitation des aquifères, les intrusions salines et la pollution constituent des menaces majeures sur les ressources en eaux souterraines dans cette sous-région, compromettant leur durabilité. « L'un des défis majeurs auxquels sont confrontés les gestionnaires des ressources en eau ainsi que les services de distribution réside dans la difficulté associée à la détermination des rendements sûrs des aquifères et à la réalisation d'évaluations régulières de l'équilibre entre rendement et demande. Souvent, les données hydrogéologiques requises, les modèles et le personnel qualifié, sont insuffisants » (Cashman, 2014, p. 1192).

Au Belize, ainsi que dans de nombreuses autres zones côtières de la région connaissant une croissance urbaine rapide, les effets des intrusions salines menacent la qualité des nappes souterraines (Campuzano et al., 2014 ; IGRAC, 2014 ; Ruz et al., 2020). En outre, le

---

[28] Efforts de collecte et d'analyse des informations, utilisation d'outils de planification et de modélisation, programmes axés sur les décisions politiques visant à réduire la répartition abusive des droits sur l'eau et l'élimination des subventions à l'électricité en milieu rural.

[29] Gestion des forêts, de l'agriculture, de la pêche et de l'élevage.

changement et la variabilité climatiques, notamment l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des ouragans, constituent également de grandes menaces pour les PEID des Caraïbes, en raison des ondes de tempête et de l'infiltration des puits. Freeport, capitale de l'île de Grand Bahama, en est une illustration parfaite. La ville est en effet entièrement alimentée par les eaux souterraines. En 2019, le passage de l'ouragan Dorian a provoqué des ondes de tempête qui ont inondé les principaux champs de captage de l'île, salinisant ses eaux à des niveaux saumâtres. Bien que les valeurs élevées de salinité ne causent pas des problèmes de santé immédiats même en cas d'ingestion, l'eau saumâtre est très désagréable à boire (Chaves, 2019).

8.3.5 Surveillance, gestion et gouvernance

En Amérique latine et dans les Caraïbes, les modalités des réseaux de surveillance ne sont pas les mêmes. Certains pays tels que le Brésil, le Chili, la Colombie, le Costa Rica, le Salvador, le Mexique, le Pérou et le Venezuela ont des programmes de surveillance nationaux. D'autres pays tels que l'Argentine ont des réseaux locaux, tandis que la Bolivie, le Paraguay et l'Uruguay assurent une surveillance des aquifères présentant un intérêt particulier (c'est-à-dire les aquifères de Pura-Purani, de Patiño et de Raigón ; Ruz et al., 2020). Outre une couverture améliorée, la fréquence et la continuité des outils et systèmes de surveillance, la gestion durable des ressources en eaux souterraines nécessite également des connaissances techniques, des changements au niveau institutionnel, des instruments juridiques et économiques et une participation sociale. À cet égard, un système formel de concessions et de droits d'utilisation des eaux souterraines peut contribuer directement à la répartition rationnelle et, dans certains cas, à la redistribution des eaux souterraines. La facturation de frais d'extraction des eaux souterraines peut également être un outil important de gestion de la demande. Toutefois, elle requiert que la quantification des extractions et des utilisations se fasse, de façon transparente, sur une base commune et acceptée (Foster et Garduño, 2009). Enfin, il est également important que les informations relatives aux eaux de surface et celles relatives aux eaux souterraines soient comparées, étant donné que les deux ressources sont souvent interdépendantes.

Grâce à l'Initiative sur la gestion des ressources des aquifères transnationaux (ISARM) des Amériques (UNESCO, 2007 ; UNESCO/OEA, 2010), 52 systèmes d'aquifères transfrontaliers ont été identifiés dans la région avec différents degrés de précision.

Le système aquifère amazonien se trouve sous une zone dont la superficie est estimée à 3,95 millions de km² (OTCA, 2018). L'Agence nationale de l'eau (ANA) du Brésil a mené des études dans le but de disposer de davantage de connaissances hydrogéologiques sur le système aquifère amazonien au Brésil, le plus grand du pays et l'un des plus grands au monde. Ce système est composé de sédiments des ères Crétacé à Cénozoïque, de nature sableuse, limoneuse et argileuse, qui emplissent les provinces hydrogéologiques de l'Amazone et de l'Orénoque. Il fait partie d'un système aquifère transfrontalier, se trouvant sous certaines parties de la Bolivie, du Brésil, de la Colombie, de l'Équateur, du Pérou et du Venezuela. Au Brésil, ce système s'étend sur 2 millions km² dans les États d'Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia et Roraima ; il dispose d'une réserve permanente estimée à 124 000 km³ et située dans les bassins sédimentaires de Marajó, Amazonas, Solimões et Acre. Les États brésiliens de Pará et d'Amapá, souffrant régulièrement de sécheresses, dépendent de cette source pour 79 % et 64 % de leurs prélèvements d'eau douce respectifs (UNESCO, 2007 ; UNESCO/OEA, 2010 ; Hu et al., 2017).

Le système aquifère Guarani (GAS) est un aquifère transfrontalier partagé par quatre pays d'Amérique latine, à savoir l'Argentine, le Brésil, le Paraguay et l'Uruguay. Le GAS s'étend sur une superficie d'environ 1,09 millions de km² (OEA, 2009). À l'échelle régionale, depuis les zones de réapprovisionnement (zones d'affleurement du GAS) jusqu'aux zones de déversement, les eaux souterraines du système aquifère Guarani ont tendance à s'écouler du nord vers le sud, suivant l'inclinaison du bassin sédimentaire du Paraná. Dans 80 % de la zone,

le GAS est confiné par des roches basaltiques, avec des eaux anciennes, voire très anciennes (de 4 000 à >100 000 ans ; Sindico et al., 2018). L'exploitation des eaux souterraines a été intense dans certaines zones, en raison de l'expansion des activités économiques et de la pollution des eaux de surface ainsi que des sécheresses périodiques. Environ 80 % des eaux souterraines pompées sont utilisées pour l'approvisionnement public, 15 % pour les procédés industriels et 5 % par les stations thermales géothermiques (Foster et Garduño, 2009). L'une des principales caractéristiques du système aquifère Guarani est son dispositif de gouvernance (voir encadré 8.5).

Encadré 8.5 L'accord relatif à l'aquifère Guarani (GAA)

En 2010, les quatre pays partageant l'Accord sur l'aquifère Guarani (Argentine, Brésil, Paraguay et Uruguay) ont décidé de négocier un traité (le premier du genre) axé sur la gestion de l'aquifère Guarani, ce qui est également remarquable au vu de l'absence de conflits graves autour de cette ressource naturelle (Villar et Costa Ribeiro, 2011). Les négociations se sont poursuivies pendant une décennie et l'Accord sur l'aquifère Guarani a été ratifié par toutes les parties avant d'entrer en vigueur, le 26 novembre 2020. L'Accord sur l'aquifère Guarani établit un cadre de gouvernance des aquifères transfrontaliers. Il contient les règles générales du droit international applicables aux ressources en eau transfrontalières (aussi bien pour les eaux de surface que pour les eaux souterraines). Les pays sont souverains mais s'engagent à coopérer et à ne pas causer de préjudices graves aux États voisins (Accord sur l'aquifère Guarani, art. 6). Les pays veilleront à utiliser l'aquifère de manière rationnelle, durable et équitable (Accord sur l'aquifère Guarani, art. 4). Établir la signification exacte de ces concepts sera un exercice de pondération et d'équilibrage basé sur plusieurs facteurs. Bien que ceux-ci ne soient pas compris dans l'Accord sur l'aquifère Guarani, on peut les trouver dans le nouveau cadre juridique international applicable aux aquifères transfrontaliers (ONU, 1997, art. 6, et CDI, 2008, art. 5). D'autres pratiques de gestion sont incluses dans le traité, comme le partage d'informations et d'activités susceptibles de toucher l'aquifère (Accord sur l'aquifère Guarani, art. 8). L'un des aspects les plus importants à souligner est l'engagement à informer les autres États si une activité prévue est susceptible d'avoir des répercussions transfrontalières (Accord sur l'aquifère Guarani, art. 9). Une autre disposition qui mérite d'être soulignée est la référence aux zones transfrontalières critiques (Accord sur l'aquifère Guarani, art. 14), qui peuvent nécessiter une attention particulière de l'ensemble des États. .

Note : L'Accord sur l'aquifère Guarani (2020) est disponible en anglais à l'adresse suivante : www.internationalwaterlaw.org/documents/regionaldocs/Guarani_Aquifer_Agreement-English.pdf.

Un autre aquifère important est le système aquifère transfrontalier Pantanal, situé dans le bassin du fleuve Paraguay. On estime la superficie de cet aquifère à environ 141 500 km² (102 000 km² au Brésil, 21 500 km² en Bolivie, 18 000 km² au Paraguay) (UNESCO/OEA, 2010). Ce système aquifère se distingue par son rôle clé dans le maintien des écosystèmes du Pantanal, la régulation naturelle du régime de précipitations et l'approvisionnement en eau des communautés locales et des populations autochtones. Étant donné qu'il s'agit d'un aquifère meuble, il est vulnérable à la pollution, en particulier celle causée par les activités agricoles et l'élevage (García, 2015). Au cours des dix dernières années, il a été menacé par une sédimentation excessive dans les rivières et dans les zones humides, causée par l'érosion accélérée due à la déforestation des hauts plateaux et aux plantations de soja. La sédimentation réduit l'infiltration et, partant, la capacité de recharge (UNESCO, 2007).

En 2006, l'initiative ISARM des Amériques a identifié un aquifère transfrontalier appelé *Esquipulas-Ocotepeque-Citalá*, situé dans la zone tri-nationale appelée *Trifinio* et partagée par le Salvador, le Guatemala et le Honduras. Le projet Gouvernance des ressources en eaux souterraines dans les aquifères transfrontaliers (GGRETA), dont l'objectif est d'acquérir de l'expérience dans la bonne gouvernance et la gestion des nappes souterraines, a choisi cet aquifère pour en faire un projet pilote. Dans le cadre de ces recherches sur l'aquifère, toutes les informations disponibles sur l'aquifère transfrontalier ont été compilées, ordonnées, analysées, hiérarchisées et systématisées, ce qui a permis d'identifier les déficits d'information. Cette

étude a montré que ce qui était supposé être un seul aquifère est en réalité composé de deux aquifères (les aquifères Esquipulas et Ocotepeque-Citalá) situés au fond de la vallée du bassin supérieur du fleuve Lempa. Ces deux aquifères ont conservé leur caractère transfrontalier. L'aquifère Esquipulas est partagé de façon trilatérale et le système aquifère Ocotepeque-Citalá est partagé de façon bilatérale, par le Salvador et le Honduras. Dans ce contexte, la nécessité de disposer d'accords de surveillance et de gouvernance se fait de plus en plus pressante. Une autre caractéristique innovante du projet GGRETA est qu'il intègre une perspective sexospécifique dans la surveillance, l'évaluation et les comptes rendus. Les indicateurs ventilés entre genres comprennent : les perceptions des hommes et des femmes quant à l'adéquation de la disponibilité actuelle de l'eau en termes de qualité et de quantité, les perceptions des hommes et des femmes sur l'égalité des genres dans les décisions des foyers en matière d'approvisionnement en eau, d'assainissement et d'hygiène (WASH) et la présence des femmes dans les coopératives et les industries liées à l'eau (UNESCO, 2016).

L'importance des aquifères pour les écosystèmes, le développement social et les activités économiques de la région d'Amérique latine et des Caraïbes ne peut que croître avec le temps, en raison du changement climatique et de ses impacts sur le cycle de l'eau

En conclusion, les États souverains abritant des aquifères nationaux et transfrontaliers auront besoin de cadres qui leur permettent d'assurer une utilisation durable des ressources en eaux souterraines. Dans des contextes transfrontières, ces ressources peuvent nécessiter la création et le maintien d'institutions supranationales, mais ces éléments à eux seuls ne suffisent pas à assurer une utilisation équitable et durable (voir chapitre 12). De même, les institutions nationales ont besoin d'informations et d'autorité pour susciter une utilisation durable. La région doit s'orienter vers des processus politiques favorisant une harmonisation de la prise de décision, de la surveillance et de la gestion des eaux souterraines tant au niveau national qu'international. L'importance des aquifères pour les écosystèmes, le développement social et les activités économiques de la région ne peut que croître avec le temps, en raison du changement climatique et de ses impacts sur le cycle de l'eau. Bien que les ressources régionales en eaux souterraines demeurent relativement abondantes, il est urgent d'améliorer la gestion et la gouvernance dans le but d'assurer l'utilisation durable de ces ressources. Il est à espérer que la recherche, le travail de terrain et la surveillance comblent les lacunes existantes dans les savoirs et fournissent une base plus solide pour la prise de décisions éclairées et coordonnées.

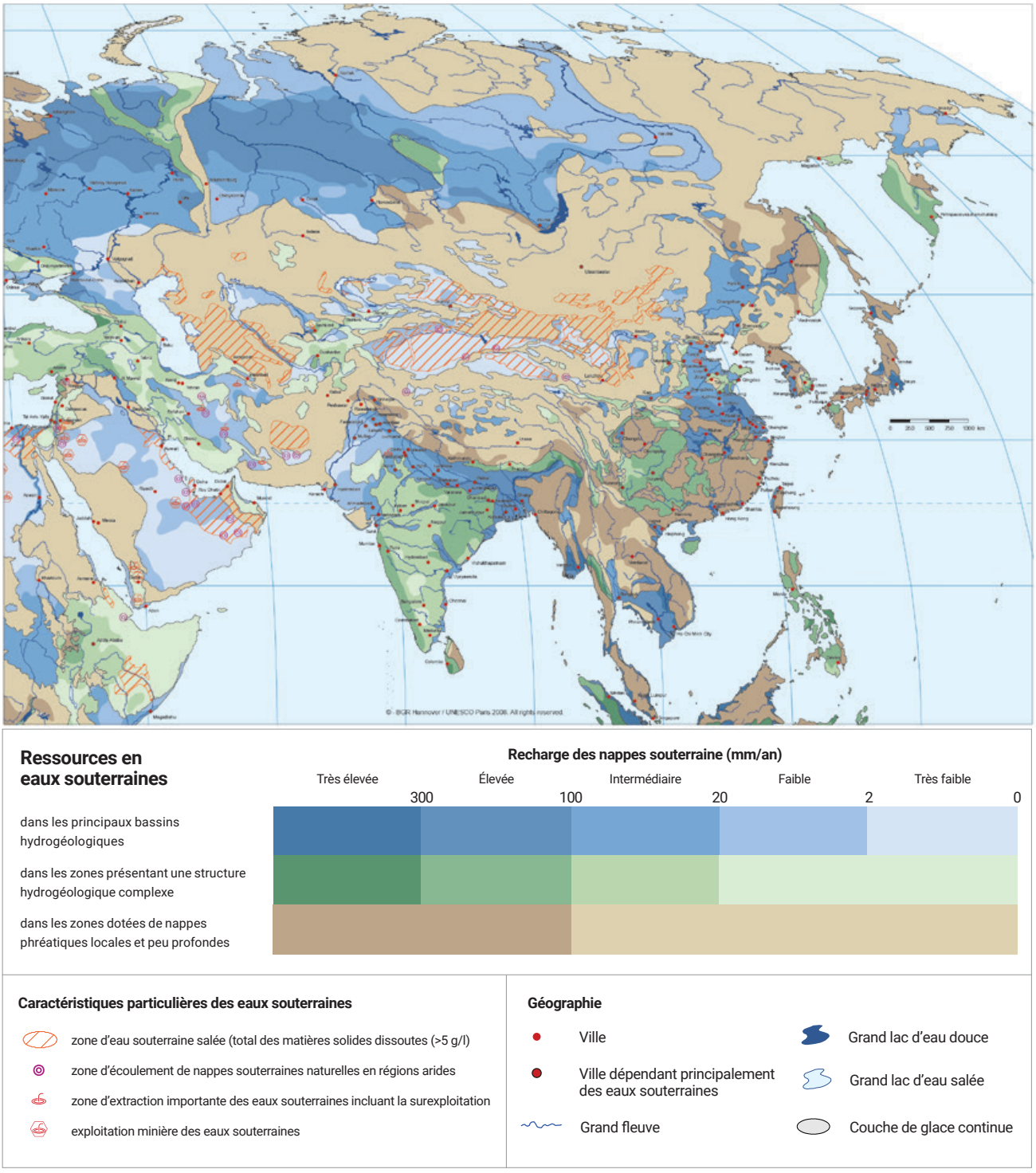
8.4 Asie et Pacifique

8.4.1 Contexte hydrogéologique général

L'Asie et le Pacifique forment la plus grande région du monde en termes de superficie (28 millions km²) et de population (4,7 milliards). Les eaux souterraines constituent une source importante d'approvisionnement en eau douce et ont joué un rôle clé dans le développement socio-économique de la région. Cependant, l'extraction non durable des ressources en eaux souterraines, en plus des impacts du changement climatique, a conduit à l'épuisement des aquifères et a accentué la pénurie d'eau dans un certain nombre de zones. En outre, la qualité des eaux souterraines est menacée par divers facteurs anthropiques et géogènes, qui contribuent à accroître le stress hydrique dans la région.

La présence de ressources en eaux souterraines varie à l'intérieur de la région en raison de ses diverses conditions géologiques. Les aquifères sédimentaires, principalement composés de dépôts alluviaux issus de plaines d'inondation, longent les grands fleuves tels que le Gange, le Mékong et le Yangtsé, et fournissent un cadre propice à la productivité des eaux souterraines. Dans les régions montagneuses d'Asie centrale et d'Asie du Nord, les eaux souterraines se trouvent généralement dans des aquifères constitués de roches dures jointives. Bien que les zones continentales arides d'Asie centrale reçoivent peu de précipitations et que s'y produise une évaporation élevée, la fonte des neiges et des glaciers dans les hautes montagnes assure une recharge essentielle des nappes souterraines. Les aquifères composés de roches carbonatées sont largement répandus en Asie du Sud-Est ; les systèmes karstiques développés, composés de calcaire stratifié, sont présents dans le sud de la Chine et dans certaines parties de la péninsule indochinoise. Quant aux aquifères des îles du Pacifique, ils sont composés de roches volcaniques quaternaires (Lee et al., 2018b ; Villholth, 2013b). La figure 8.6 présente les ressources en eaux souterraines et leur recharge dans la région.

Figure 8.6 Ressources en eaux souterraines de l'Asie ainsi que de l'Australie et de l'Océanie

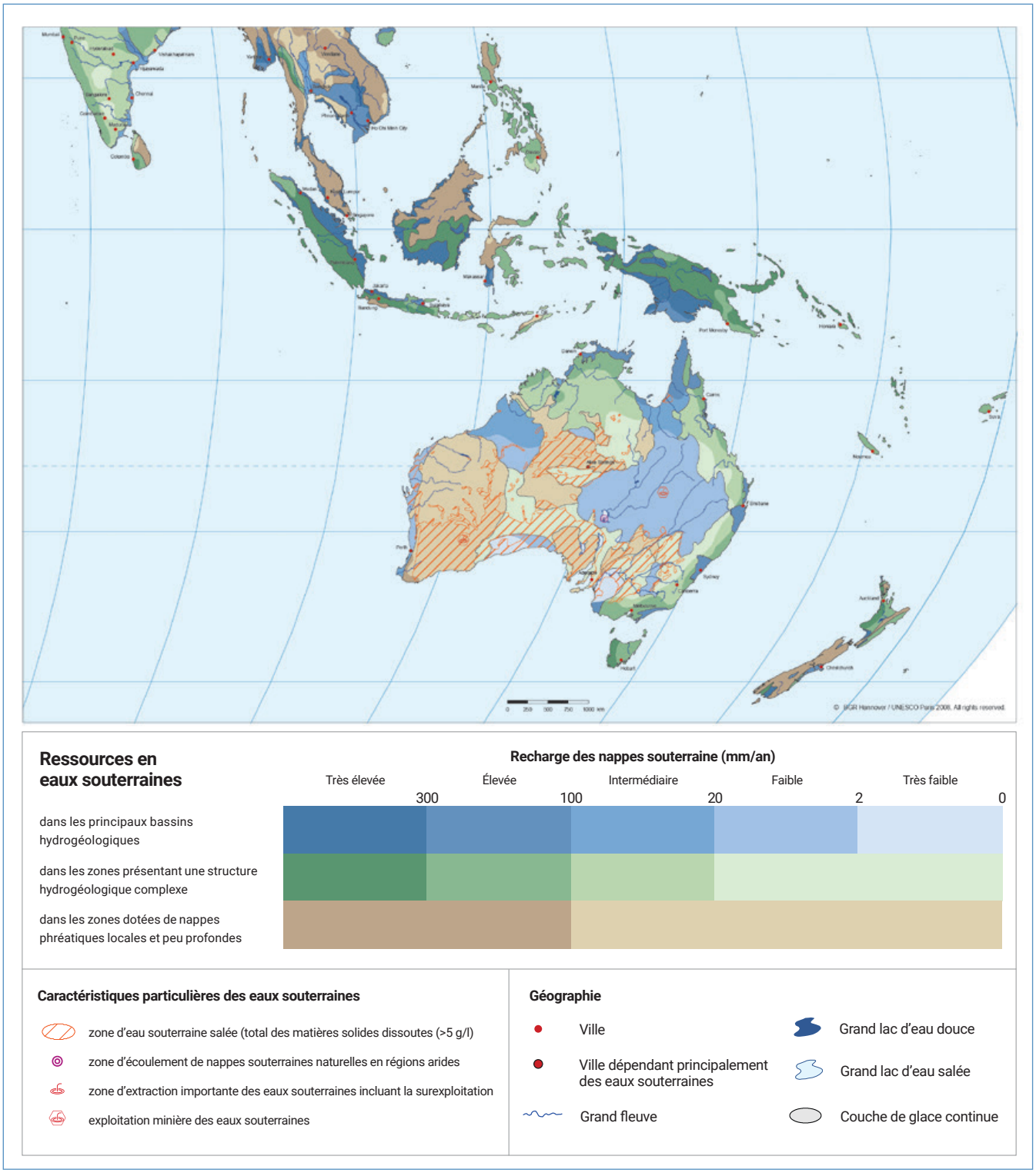


Source : BGR/UNESCO (2008).

8.4.2 Importance des eaux souterraines

La région Asie-Pacifique est responsable de la majeure partie des extractions d'eaux souterraines dans le monde puisqu'elle compte sept des dix pays qui en prélèvent le plus (Bangladesh, Chine, Inde, Indonésie, Iran, Pakistan et Turquie). À eux seuls, ces pays totalisent environ 60 % de toutes les extractions d'eaux souterraines de la planète (Aquastat, n.d.). Le principal moteur de l'exploitation des nappes souterraines dans la région est l'augmentation de la demande en eau en raison de la croissance démographique, du développement économique rapide et de l'amélioration des conditions de vie. L'utilisation des ressources en eaux souterraines a eu de nombreux avantages positifs pour l'irrigation, l'activité industrielle, l'usage domestique, la résilience aux sécheresses et l'amélioration des moyens de subsistance. Ces

Figure 8.6 Ressources en eaux souterraines de l'Asie ainsi que de l'Australie et de l'Océanie



Source : BGR/UNESCO (2008).

avantages socioéconomiques ont été particulièrement cruciaux pour le secteur agricole, un secteur clé du développement économique de nombreux pays en développement de la région et qui compte pour environ 82 % du total des extractions (Aquastat, n.d.). La croissance rapide de l'irrigation par les eaux souterraines, notamment dans la plaine de Chine du Nord et en Asie du Sud entre 1970 et 1995, a été le principal facteur de l'essor agraire dans cette région (Shah et al., 2003). En tant que ressource indispensable à l'irrigation, les eaux souterraines contribuent à la sécurité alimentaire et la réduction de la pauvreté. La dépendance de cette région vis-à-vis des eaux souterraines est liée à l'augmentation de la production alimentaire ou au manque d'approvisionnement en eaux de surface. De 1960 à 2015 par exemple, la population de l'Inde a presque doublé, en parallèle de quoi l'indice de production alimentaire du pays a

augmenté de 330 % (Lee et al., 2018b). Si la dépendance de l'agriculture irriguée vis-à-vis des nappes souterraines est évidente en Asie du Sud et en Chine, les secteurs industriels et municipaux sont également de grands utilisateurs d'eaux souterraines dans les centres urbains (Kataoka et Shivakoti, 2013). Les nappes souterraines sont également la source la plus adaptée aux besoins en eau potable et en irrigation en Asie du Sud, les conduites des eaux de surface ayant servi historiquement de voies de circulation aux déchets domestiques et industriels, les rendant impropres à l'usage (Mukherjee, 2018). De plus, les aquifères permettent d'amortir les effets des variations climatiques, ce qui contribue à stabiliser l'approvisionnement en eau pendant les périodes de sécheresse intense.

8.4.2 Défis

Les eaux souterraines constituent une source importante d'approvisionnement en eau douce et ont joué un rôle clé dans le développement socio-économique de la région

Les eaux souterraines sont abondantes dans la majeure partie la région Asie-Pacifique ; pourtant, les risques d'épuisement des nappes suscitent des inquiétudes quant à la durabilité de leur emploi dans différentes zones d'Asie centrale, de Chine, d'Asie du Sud et dans certains centres urbains d'Asie du Sud-Est. (Jia et al., 2019 ; Kataoka et Shivakoti, 2013 ; Lee et al., 2018b ; Mukherjee, 2018). L'épuisement sévère des nappes souterraines peut compromettre la production alimentaire, les moyens de subsistance et l'approvisionnement en eau à usage industriel, et provoquer des affaissements de terrain, des intrusions d'eau de mer et des dommages écologiques. Le changement climatique affecte également la variabilité des précipitations dans la région, accentuant encore davantage la pression sur les ressources en eaux souterraines, surtout dans les zones ayant un climat semi-aride à aride et sur les PEID du Pacifique, où les eaux souterraines constituent la seule source fiable d'eau potable alors qu'elles sont menacées par l'élévation du niveau de la mer (Ashfaq et al., 2009 ; Asoka et al., 2017 ; Bouchet et al., 2019 ; Dixon-Jain et al., 2014). En outre, étant donné que l'extraction des eaux souterraines devrait augmenter à l'avenir en raison de la forte demande en eau liée aux activités économiques et domestiques et que la recharge des nappes souterraines diminuera du fait des variations climatiques, le risque de pénurie d'eau devrait également augmenter (Hofmann et al., 2015).

En dehors de l'épuisement des nappes souterraines, la contamination de leurs eaux par des processus tant anthropiques que géogènes est un problème supplémentaire tout aussi préoccupant, puisque les eaux impropres à la consommation contribuent également à accroître le stress hydrique dans la région (Hirji et al., 2017 ; MacDonald et al., 2016). La mobilisation de contaminants géogènes tels que l'arsenic (aquifère du bassin indo-gangétique, delta du fleuve Rouge, delta du fleuve Mékong), le fluorure (îles du Pacifique, péninsule sud de l'Inde, Sri Lanka, Chine centrale et occidentale) et l'uranium (Chine, Inde) pose un risque sanitaire conséquent pour les personnes vivant dans ces régions (Coyte et al., 2018 ; Hara, 2006 ; Ministère de l'environnement du Japon/IGES, 2018 ; Le Luu, 2019 ; Mukherjee, 2018). Les contaminants anthropiques présents dans les nappes souterraines, tels que les métaux lourds (cadmium, chrome, plomb, mercure), les coliformes, la salinité et les nouveaux contaminants[30] sont un problème qui prend de l'ampleur (Lapworth et al., 2018 ; Sui et al., 2015) au fur et à mesure que l'urbanisation rapide, l'intrusion d'eau de mer, l'agriculture intensive et l'activité industrielle continuent d'augmenter dans la région Asie-Pacifique. De plus, les sous-produits de désinfection (SPD) nécessitent d'être manipulés avec précaution étant donné que la chloration des eaux souterraines à partir d'halogénures et de carbone organique dissous (COD) peut favoriser la formation de SPD toxiques dans l'eau potable (Coyte et al., 2019).

La croissance économique et démographique rapide, à laquelle s'ajoutent une mauvaise planification et une gouvernance inappropriée, a entraîné une surexploitation et une dégradation de la qualité de l'eau dans certaines zones, menaçant les vies et les moyens de subsistance des populations qui dépendent de cette ressource essentielle (Kataoka et

[30] Les nouveaux contaminants proviennent des produits pharmaceutiques, des pesticides, des produits chimiques industriels, des microplastiques, des agents de surface et des produits d'hygiène personnelle.

Shivakoti, 2013 ; Lall et al., 2020 ; Shah et al., 2003). Par exemple, le bassin de la rivière Kharaa en Mongolie est une zone qui connaît un important développement économique et industriel — grâce aux avantages économiques positifs tirés des exploitations minières, de l'agriculture, de l'élevage et du tourisme — mais ces activités, combinées à l'accélération de l'urbanisation, contribuent à accroître la pollution des nappes souterraines (Hofmann et al., 2010, 2014).

Il a été démontré que la pollution associée à l'utilisation excessive de produits chimiques dans l'agriculture affecte la qualité des eaux souterraines situées bien en dessous de la surface. Dans la plaine de Chine du Nord, des nitrates ont été détectés à 24 mètres de profondeur (Chen et al., 2005).

Il est indispensable de renforcer la gouvernance des eaux souterraines, en s'appuyant sur le soutien de la population et sur de plus amples capacités d'encadrement

Il est donc indispensable que l'exploitation et l'utilisation continues des nappes souterraines soient effectuées de manière durable afin de réduire la pression sur ces ressources. Bien qu'il existe, dans toute la région, des pratiques de gestion et des systèmes institutionnels, juridiques et réglementaires en charge des problèmes liés aux eaux souterraines, la gouvernance de celles-ci pose des difficultés en raison du régime d'accès illimité en place dans de nombreux pays. Par conséquent, il est indispensable de renforcer cette gouvernance, en s'appuyant sur le soutien de la population et sur de plus amples capacités d'encadrement. Les problèmes concernant l'épuisement des nappes souterraines, l'affaissement des terres et la contamination des eaux souterraines nécessitent des actions d'urgence et une coopération transfrontalière afin d'atténuer les évolutions négatives actuelles et d'assurer, à l'avenir, la sécurité de l'eau dans cette région.

8.4.4 Solutions

Les systèmes de nappes souterraines et les activités qui en dépendent sont complexes. Par conséquent, l'élaboration efficace des politiques requiert une bonne compréhension des conditions hydrogéologiques des aquifères, de la demande en eau ainsi que des besoins sociaux et économiques. S'il n'existe pas de solution universelle à tous les problèmes auxquels font face les systèmes de nappes souterraines, il existe un certain nombre d'actions et de directions que les gouvernements nationaux peuvent suivre pour répondre à ces problèmes. Ci-dessous sont présentés trois exemples de situations dans lesquelles des gouvernements ont pris des mesures pour relever les défis relatifs aux eaux souterraines.

Recharge des nappes souterraines au Rajasthan (Inde)

Le Rajasthan, l'État le plus aride de l'Inde, est exposé à de fréquentes sécheresses et dépend fortement des nappes souterraines tant pour l'irrigation que pour la consommation humaine. Confrontées à des précipitations irrégulières, à une surexploitation des nappes souterraines ainsi qu'à des pertes par évaporation les plus élevées du pays, les communautés agricoles de la région peinent de plus en plus à répondre à leurs besoins en eau. En 2016, les autorités du Rajasthan ont lancé le *Mukhyamantri Jal Swavlamban Abhiyan* (MJSA), un programme visant à aider les communautés rurales à devenir autonomes par rapport à leurs besoins hydriques. En se basant sur la MAR (voir encadré 7.1 et section 11.5), le programme a conduit à la construction de réservoirs d'irrigation, de barrages, de tranchées et d'autres structures de collecte afin de capter les eaux de ruissellement. Le programme a également encouragé la conservation de l'eau à travers la micro-irrigation, et a amélioré le bassin versant en plantant des arbres sur les terres stériles et en créant des pâturages. Après deux moussons, des résultats ont été obtenus : sur les 21 districts non désertiques, 16 ont connu une augmentation du niveau des nappes souterraines de 1,4 mètre en moyenne. Les évaluations d'impacts internes indiquaient aussi que les villages participant avaient réduit le transport de l'eau (c'est-à-dire les camions-citernes) de 56 % par rapport aux villages qui n'avaient pas participé au programme (Verma et Shah, 2019).

Interventions visant à endiguer l'épuisement des nappes souterraines sur la plaine de Chine du Nord

La plaine de Chine du Nord est l'un des endroits en Chine, et dans le monde, où les ressources en eau sont le moins disponibles. Le développement économique rapide qui s'y est produit au cours des quarante dernières années a été permis par l'exploitation des nappes souterraines, qui a entraîné une baisse importante du niveau de ces nappes, limitant toute possibilité de développement futur dans la région. Ces dernières années, de multiples plans de gestion des eaux ont été mis en œuvre dans le but de pallier ce problème. Les mesures prises comprennent la collecte des eaux de pluie, le détournement de l'eau des rivières du sud, la promotion des technologies d'irrigation économes en eau, la subvention des cultures résistantes à la sécheresse et des projets « Grain for Green »[31]. Grâce à ces mesures et d'autres, le taux de diminution des nappes souterraines semble avoir été réduit à Pékin et dans une partie de la province du Hebei (Shao et al., 2017 ; Xu et al., 2018 ; Zhao et al., 2020).

Programme d'adaptation de Kiribati

La République de Kiribati est principalement composée d'îles atolls de faible altitude d'une superficie totale de 726 km², située au centre et à l'ouest de l'océan Pacifique. Kiribati est l'un des pays au monde les plus petits et les plus reculés, géographiquement dispersés et vulnérables au changement climatique. Le pays est soumis à des sécheresses fréquentes et prolongées, tandis que l'élévation du niveau de la mer menace considérablement l'approvisionnement en eau douce du pays (eau de pluie et eaux souterraines non confinées peu profondes). Dans tout le pays, l'eau potable provient principalement de fines lentilles d'eaux douces souterraines flottant sur l'eau de mer plus dense au sein de l'aquifère. Compte tenu de la fragilité de ces lentilles, si leur équilibre est perturbé en raison de sécheresses ou de surexploitation, les eaux souterraines deviennent saumâtres et impropres à la consommation et à l'irrigation. De 2011 à 2018, le Gouvernement de Kiribati a mené plusieurs actions pour renforcer la résilience du pays au changement climatique aux niveaux national, insulaire et communautaire, avec le soutien et les contributions des partenaires au développement.

En intensifiant les mesures adoptées lors des deux phases pilotes précédentes, la phase III du Programme d'adaptation de Kiribati (KAP)[32] a mis en œuvre une méthode holistique qui comprenait :

- L'amélioration de l'emploi et de la gestion de l'eau par l'installation de systèmes de collecte de l'eau de pluie ainsi que de systèmes d'extraction des eaux souterraines utilisant des tuyaux d'infiltration horizontaux, placés à de faibles profondeurs pour extraire l'eau depuis l'intérieur de la lentille d'eau douce ;
- La réduction des fuites d'eau et des déchets dans les systèmes existants ;
- La protection des réserves en eau ;
- L'amélioration de la planification à long terme pour la gestion locale de l'eau ;
- La protection contre l'érosion côtière en investissant dans des barrières de protection telles les digues et la plantation des mangroves ;
- Le renforcement des capacités gouvernementales et communautaires à gérer les impacts du changement climatique et des catastrophes naturelles grâce à une politique nationale de gestion des côtes, en complément des plans d'adaptation gérés au niveau local.

Des rapports d'évaluation indiquent que grâce au projet, le nombre de personnes ayant accès à des sources d'eau améliorées est passé de 5 000 (en 2017) à 12 780, dépassant de 116 % l'objectif initial du projet, qui était de 11 000 personnes. Les efforts de réhabilitation des systèmes d'eau existants ont permis de détecter et d'éliminer des pertes en eau de 645 m³/jour ; la combinaison de mesures d'ingénierie et de mesures fondées sur la nature a fourni 1,87 km de protection contre l'érosion côtière (Banque mondiale, 2019).

---

[31] Officiellement connu sous le nom de Programme de conversion des terres cultivées en forêts, le programme paie les agriculteurs pour qu'ils plantent des arbres sur leurs terres et met des terres dégradées à la disposition des familles rurales pour qu'elles les restaurent.

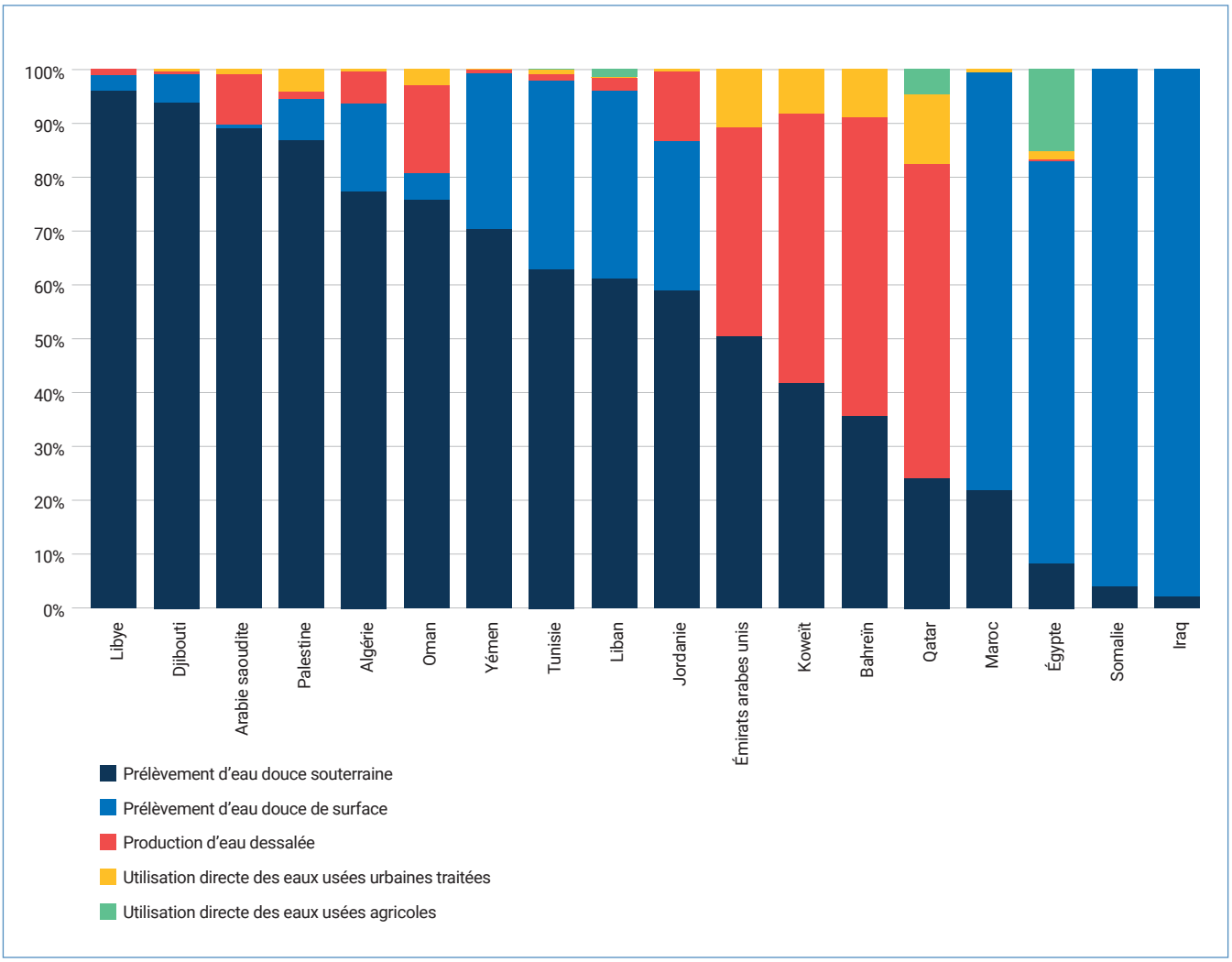
[32] projects.worldbank.org/en/projects-operations/project-detail/P112615.

8.5 Région arabe

8.5.1 Contexte régional

La région arabe compte parmi les régions les plus pauvres en eau du monde. En 2020, dix-neuf des vingt-deux États arabes sont passés sous le seuil de pénurie d'eau renouvelable, établi à 1 000 m³ par habitant et par an, treize États se trouvant en deçà du seuil de pénurie d'eau absolu, établi à 500 m³ par habitant et par an (DESA, 2020 ; Aquastat, n.d.). D'ici à 2050, dix-sept pays arabes devraient passer sous le seuil de pénurie d'eau absolu (DESA, 2020 ; Aquastat, n.d.). Une telle situation alarmante a incité les pays à mettre à contribution d'autres ressources en eau conventionnelles et non conventionnelles afin de répondre à leurs besoins en eau douce. Les eaux souterraines sont la source d'eau la plus utilisée dans onze des vingt-deux États arabes au moins. Elle représentent plus de 80 % des prélèvements d'eau douce en Libye, à Djibouti, en Arabie saoudite et en Palestine (voir figure 8.7) (Aquastat, n.d.).

Figure 8.7 Origine des extractions d'eau souterraine par type de source dans certains États arabes



Note : Les données ne se rapportent pas toutes à la même année. Les données les plus récentes ont été utilisées pour chaque pays.

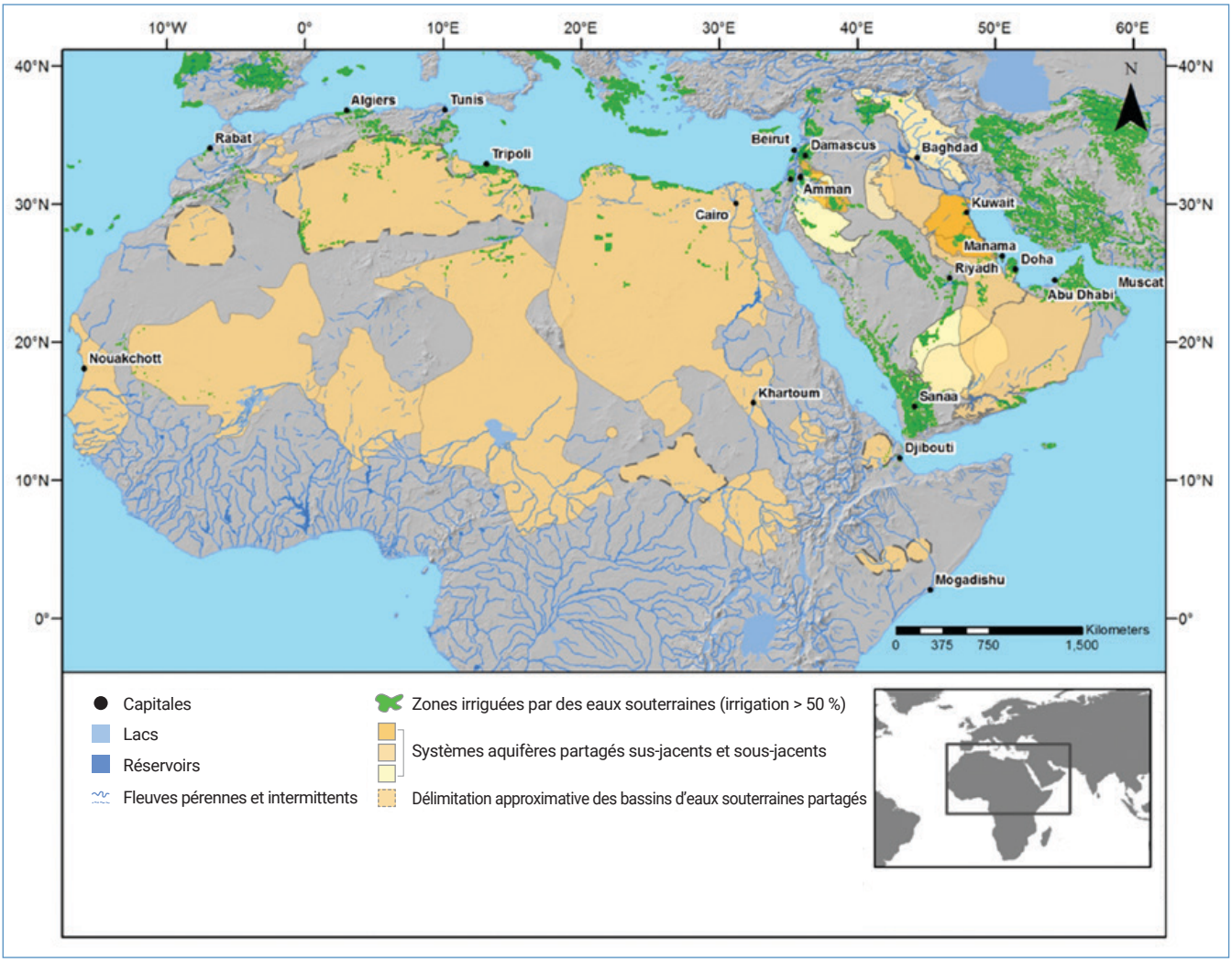
Source : basé sur les données d'Aquastat (n.d.), Al-Zubari et Alajjawi (2020) (pour le Koweït) et Abd-El-Mooty et al. (2016) (pour l'Irak).

Les nappes souterraines de la région ont également tendance à s'étendre sur de vastes zones géographiques au-delà des frontières politiques. La plupart des ressources en eaux souterraines de la région arabe ne sont pas renouvelables et doivent donc être gérées en tenant compte du fait qu'elles constituent une ressource épuisable. Cependant, la surveillance de l'extraction des eaux souterraines reste difficile, malgré l'émergence de nouvelles technologies. La gestion des eaux souterraines s'en trouve d'autant plus compliquée, notamment dans un contexte transfrontalier. Tous les États arabes, exception faite des Comores, mettent à contribution une ou plusieurs nappes souterraines transfrontalières, étant donné que 42 systèmes aquifères transfrontaliers couvrant presque 58 % de la surface de la région arabe (voir figure 8.8).

L'aquifère des grès de Nubie possède une superficie de 2,17 millions de km² avec une réserve de 373 000 milliards de m³, que se partagent le Tchad, l'Égypte, la Lybie et le Soudan (Bakhbakhi, 2006).

Une coopération étroite est nécessaire pour assurer une gestion adéquate des aquifères transfrontaliers. En effet, dans le domaine des eaux souterraines, la coopération transfrontière demeure malheureusement très limitée dans la région. La Jordanie et l'Arabie saoudite ont signé un accord de coopération pour l'aquifère Al-Disi/Saq-Ram en 2015. Cet accord visait à assurer une gestion, une utilisation et une durabilité adéquates des nappes souterraines sous la supervision d'un comité technique conjoint[33]. En ce qui concerne l'aquifère nubien transfrontalier, partagé par le Tchad, l'Égypte, la Libye et le Soudan, la coopération se fait à travers une autorité conjointe chargée de l'étude et du développement des eaux souterraines. Quant au système aquifère du Sahara septentrional (SASS) partagé par l'Algérie, la Libye et la Tunisie, la coopération et le partage des données sont facilités par un mécanisme de consultation sous l'égide de l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS) (CESAO, 2019).

Figure 8.8 Systèmes aquifères transfrontaliers dans la région arabe



Source : CESAO (2015, carte 2, p. 33). @CESAO.

[33] Accord entre le Gouvernement du Royaume hachémite de Jordanie et le Gouvernement du Royaume d'Arabie saoudite pour la gestion et l'utilisation des eaux souterraines de l'aquifère Al-Sak / Al-Disi, 30 avril 2015, www.internationalwaterlaw.org/documents/regionaldocs/Disi_Aquifer_Agreement-English2015.pdf.

8.5.2 Défis relatifs aux eaux souterraines

La croissance démographique, le développement socio-économique et le changement climatique augmentent le stress sur les eaux souterraines et menacent la sécurité hydrique dans la région. La surexploitation des nappes souterraines dans de nombreuses parties de la région a entraîné une baisse du niveau de celles-ci, en particulier dans les zones agricoles et très peuplées. Cette situation est d'autant plus alarmante que les eaux souterraines constituent la principale source d'eau pour les groupes vulnérables qui ne sont pas officiellement raccordés aux services d'eau ou qui n'y ont pas accès. L'analyse des données de la mission GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) a confirmé une tendance générale à la baisse des réserves d'eaux souterraines dans la région Arabe. En effet, les anomalies de ces réserves par rapport à la période de référence (2004 à 2009) montrent que la zone affectée par cette baisse s'était élargie de 75 % en octobre 2011 et de 100 % en octobre 2018, en comparaison avec octobre 2002, alors qu'elle s'était élargie de 65 % en avril 2011 et de 95 % en avril 2019, en comparaison avec avril 2002 (voir figure 8.9). Ces chiffres illustrent non seulement la tendance à la baisse considérable des réserves d'eaux souterraines entre 2002 et 2019 (voir figure 8.9 — diagramme), mais soulignent aussi l'effet de la variabilité saisonnière sur les réserves d'eaux souterraines en plus des prélèvements excessifs lors la période sèche. De plus, l'épuisement des nappes souterraines dans les aquifères, en particulier les aquifères ayant des ressources d'eaux souterraines non renouvelables, est estimé à 317 % du volume renouvelable dans les États membres du Conseil de coopération du Golfe (Al-Zubari et al., 2017).

La contamination est un autre facteur majeur de stress hydrique qui menace la disponibilité des eaux douces souterraines de bonne qualité. Les pratiques agricoles non durables ainsi que les activités industrielles et l'urbanisation ont un impact considérable sur la qualité des eaux souterraines. C'est la salinité qui constitue le principal problème des nappes souterraines en termes de qualité et le plus fréquemment observé dans les villes côtières où la surexploitation entraîne l'intrusion d'eau de mer. On peut citer le système aquifère Umm er Radhuma-Dammam qui possède des eaux saumâtres à salines dans sa zone côtière, qui comprend des parties du Bahreïn, du Koweït, du Qatar, de l'Arabie saoudite et des Émirats arabes unis, avec une valeur de matières dissoutes totales (MDT) supérieure à 1 g/l (CESAO/BGR, 2013).

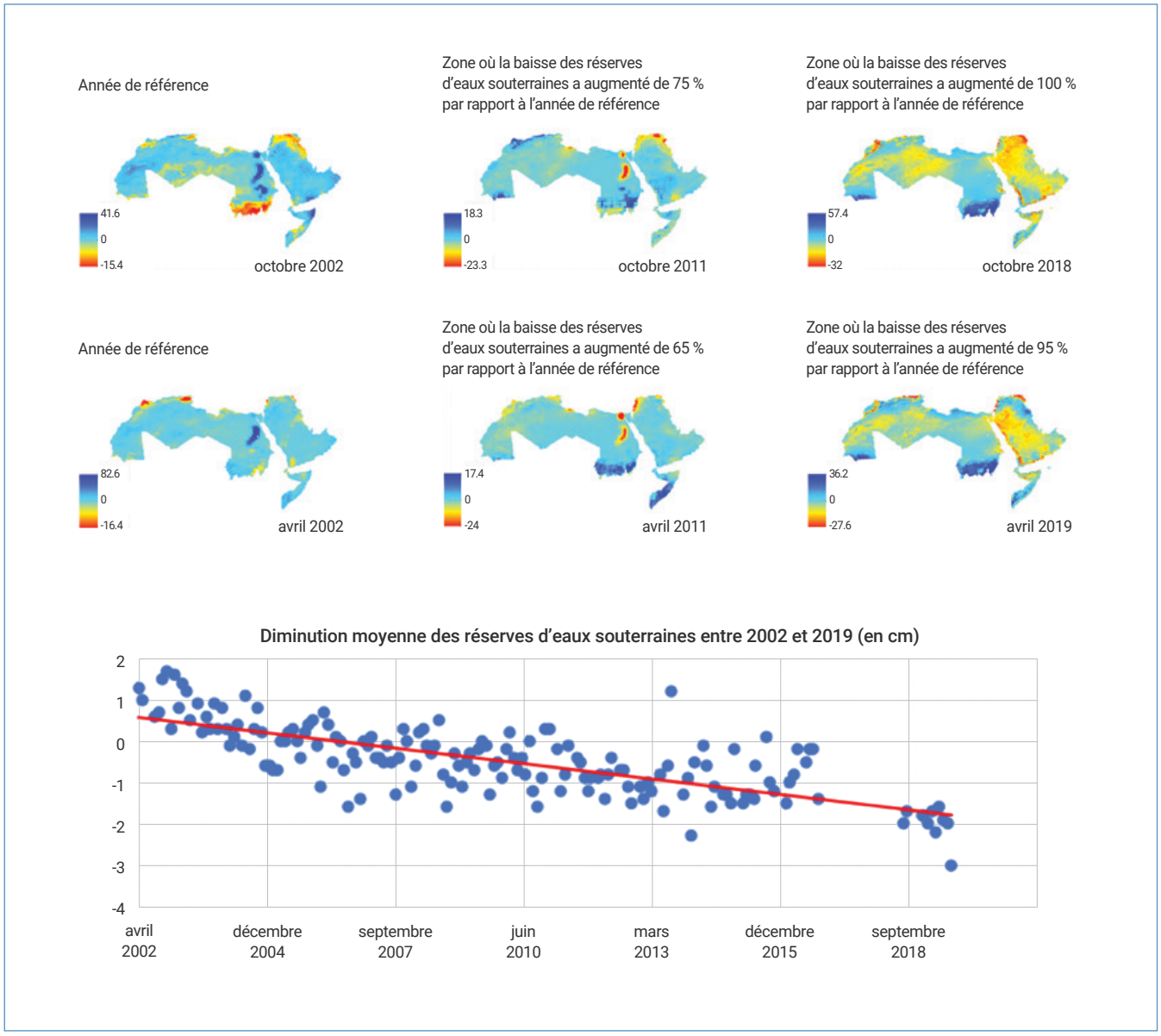
Le changement climatique affecte encore davantage la disponibilité des eaux souterraines en diminuant la recharge des aquifères et la disponibilité des eaux de surface, ce qui entraîne une augmentation du pompage. S'appuyant sur les projections d'une modélisation du climat régional pour guider la modélisation hydrogéologique, la Commission économique et sociale des Nations Unies pour l'Asie occidentale a établi que la nappe souterraine de l'aquifère Ben Tadla au Maroc allait diminuer de 10 m à plus de 25 m selon différents scénarios climatiques entre 2020 et 2100, laissant certaines zones de l'aquifère complètement sèches (CESAO, à paraître).

Les limites imposées à la gouvernance des nappes souterraines dans la région Arabe compliquent encore davantage la recherche de solutions à ces défis. Un rapport de diagnostic régional sur la gouvernance des eaux souterraines dans la région a relevé l'inadéquation ou l'insuffisance des politiques et des législations relatives aux eaux souterraines, outre une volonté politique défaillante pour les mettre en œuvre. À ces difficultés s'ajoutent d'autres problèmes de gouvernance tels que l'insuffisance des financements, la faiblesse des institutions et de la coordination, la faiblesse des systèmes de surveillance et le manque d'informations, ce qui entraîne une mauvaise compréhension des systèmes de nappes souterraines (Al-Zubari, 2014).

8.5.3 Innovations

En raison du fait qu'ils sont de plus en plus conscients de l'importance accrue des eaux souterraines et de leur dépendance vis-à-vis de celles-ci, certains pays arabes cherchent de nouvelles manières de gérer cette ressource vitale. Au Maroc, des contrats de gestion des aquifères ont été mis en place, servant de nouvelle mesure de gestion participative

Figure 8.9 Évolution des réserves d'eaux souterraines (épaisseur équivalente en eau liquide) dans la région arabe, entre 2002 et 2019, établie à partir des données de la mission GRACE (en cm)



Source : compilé par la CESAO, basé sur McStraw (2020) et GRACE 2.0 (n.d.).

des nappes souterraines, destinée à améliorer la durabilité en fonction des besoins locaux (voir encadré 8.6). Les savoirs traditionnels continuent également d'être appliqués, tel l'*aflaj*, un ancien système de tunnels utilisés pour acheminer l'eau par gravité pour l'irrigation, principalement à partir de sources souterraines. À Oman, plus de 3 000 convoyeurs *aflaj* fonctionnels continuent de fournir de l'eau pour l'agriculture. Les pratiques communes et les arrangements traditionnels sont également mis à contribution pour la distribution équitable de l'eau aux parties prenantes d'une génération à l'autre (Ministère des municipalités régionales, de l'environnement et des ressources en eau du Sultanat d'Oman, 2006).

De nombreux pays arabes se tournent de plus en plus vers la MAR (voir encadré 7.1 et section 11.5) pour compenser l'épuisement des nappes souterraines et en améliorer la qualité. En Tunisie par exemple, les eaux usées traitées sont rejetées dans un bassin d'infiltration pour la MAR dans l'aquifère de Korba depuis 2008. Les résultats font état d'une certaine amélioration de la salinité des nappes souterraines, mais l'encrassement a réduit l'efficacité

En raison du fait qu'ils sont de plus en plus conscients de l'importance accrue des eaux souterraines et de leur dépendance vis-à-vis de celles-ci, certains pays arabes cherchent de nouvelles manières de gérer cette ressource vitale

de cette méthode (Jarraya-Horriche et coll., 2020). Au Qatar, trois types de MAR ont été mises en œuvre. La première consiste à effectuer la recharge par des puits situés dans des zones de dépression dans lesquelles l'eau de pluie s'accumule naturellement ; ceci est mis en œuvre dans des zones non urbaines pour recharger les bassins d'eaux souterraines. Le deuxième type utilise de l'eau recyclée, principalement des eaux usées traitées, pour recharger des forages profonds dans le bassin de Doha. Le troisième type recueille et traite les eaux de pluie en zones urbaines et les mélange avec des eaux souterraines peu profondes afin de recharger les puits profonds de l'aquifère de Doha et réduire la salinité de l'eau (Al-Muraikhi et Shamrukh, 2017). Les Émirats arabes unis ont commencé à travailler sur la MAR en 2001, avec le projet de Nizwa à Sharjah qui a constitué le premier exemple de stockage et récupération de l'eau par les aquifères (ASR) réussi pour un aquifère non confiné aux EAU (Sharjah Electricity and Water Authority, 2015). Abou Dhabi a ensuite accueilli la plus grande initiative d'ASR au monde (voir encadré 8.7), utilisant l'eau dessalée pour recharger un aquifère sablonneux dans des dunes désertiques près de l'oasis de Liwa. L'eau stockée ici peut être récupérée en cas d'urgence (Stuyfzand et coll., 2017). À Oman, en Arabie saoudite et aux Émirats arabes unis, les barrages de régularisation, construits sur les lits des rivières pour détourner le ruissellement et recharger les aquifères, demeurent les infrastructures les plus couramment utilisées dans la région dans le cadre de la MAR.

Encadré 8.6 Contrats de gestion des aquifères au Maroc

Le Maroc fait face à une insécurité hydrique grandissante, qui incite à une utilisation non durable des nappes souterraines. En réaction, le gouvernement a adopté, en 2006, une nouvelle méthode de gestion qui attribue des contrats de gestion des aquifères à tous les consommateurs d'eau souterraine dans la région d'un aquifère donné. À l'intérieur de ce cadre participatif, des accords sont conclus entre les parties prenantes locales, y compris les organisations gouvernementales, les institutions publiques, les associations agricoles d'utilisateurs d'eau et les institutions de recherche, dans l'optique de déterminer les besoins de chacun et de garantir des bénéfices mutuels, et ce afin d'améliorer la gestion et la disponibilité des eaux souterraines. Cette approche entre en contraste avec les dispositions de gestion centralisée, administrées au niveau national.

L'utilisation des contrats de gestion des aquifères a d'abord été mise à l'essai dans le bassin de la rivière Souss-Massa-Draa, qui comprend trois aquifères. Le contrat relatif à l'aquifère de Souss, signé en 2006 entre le gouvernement et les parties prenantes concernées, fixe des objectifs généraux d'utilisation de l'eau définis conjointement, en mettant l'accent sur les eaux souterraines ; il comprend une liste des activités qui doivent être menées pour la réalisation de ces objectifs. Les parties prenantes locales ont une responsabilité commune dans la durabilité des nappes souterraines, ce qui représente une motivation pour la mise en œuvre et le développement du contrat d'aquifère.

Le contrat de gestion de l'aquifère de Souss est le fruit de la signature de l'Accord-cadre pour la protection et le développement des ressources en eau dans le bassin de Souss-Massa, qui a été suivi de six autres accords de partenariat spécifique, convenus entre les parties prenantes locales. Ceux-ci définissent des objectifs et des activités en s'inspirant de l'Accord-cadre (Closas et Villholth, 2016).

Cette méthode par contrats de gestion des aquifères est la première dans la région arabe et reflète les opportunités offertes par la décentralisation et l'intégration des utilisateurs locaux dans des processus de décision participatifs. Toutefois, afin de traduire cette approche participative en résultats concrets, il faut faire davantage pour inclure des petits agriculteurs, y compris les femmes et les groupes marginalisés, sans parler de l'harmonisation des politiques entre les secteurs.

D'autres pays en sont encore à la phase d'essai des méthodes de recharge artificielle ou les mettent en œuvre à plus petite échelle. Le Koweït, par exemple, mène une étude et un projet pilote d'ASR sur les aquifères de Dammam et de Kuwait group depuis les années 1980, en utilisant l'eau dessalée et les eaux usées traitées (Al-Rukaibi, 2010). À Bahreïn, une étude récente a identifié six sites pouvant être employés, de façon optimale, pour la MAR grâce à la collecte des eaux de pluie (Kadhem et Zubari, 2020). Au Liban, des évaluations préliminaires ont été menées à terme pour vingt-deux sites utilisant des sources d'eau naturelles (rivières et sources) et dix sites utilisant des eaux usées traitées, afin de recharger douze bassins d'eaux souterraines qui sont soit en cours d'épuisement, soit envahis par de l'eau de mer. C'est l'injection par puits qui a été choisie comme technique de recharge car étant la plus adaptée à un environnement karstique et la plus rentable (PNUD/Ministère de l'énergie et de l'eau du Liban, 2014).

Dans un contexte marqué par le changement climatique, l'importance des eaux souterraines pour la sécurité de l'approvisionnement en eau de la région requiert une meilleure gouvernance fondée sur des méthodes de gestion innovantes, une utilisation accrue des technologies, un financement spécifique visant à mieux comprendre cette ressource et une coopération régionale renforcée.

Encadré 8.7 Application de la MAR à Abou Dhabi

Le projet Liwa aux Émirats arabes unis, qui a été inauguré en 2004, est le plus grand projet MAR au monde. On y pratique le stockage et la récupération de l'eau par les aquifères (ASR), qui consiste à injecter de l'eau dessalée dans un aquifère sablonneux dans des dunes désertiques afin d'utiliser l'eau en cas d'urgence, sans traitement. Le processus de recharge a débuté en 2015 et l'aquifère a atteint sa pleine capacité en 2017.

Le système ASR de Liwa n'est pas ordinaire, étant donné que l'ASR se fait habituellement par puits uniquement. Dans ce cas, au contraire, trois bassins de recharge souterrains, chacun entouré de 105 puits de récupération, ont été utilisés. L'objectif est d'injecter 26 500 m³/jour d'eau dessalée pendant 824 jours, avec une concentration de matières dissoutes totales (MDT) inférieure à 250 ppm, et de pouvoir récupérer l'eau, en cas d'urgence, à un débit de 170 280 m³/jour pendant 90 jours, avec une valeur de MDT d'environ 400 ppm. L'efficacité de la récupération varie, selon les tests, entre 60 et 85 %, prouvant la capacité de la MAR à réduire les risques de catastrophe et à contribuer aux solutions d'urgence.

Source : Stuyfzand et al. (2017). .

Chapitre 9

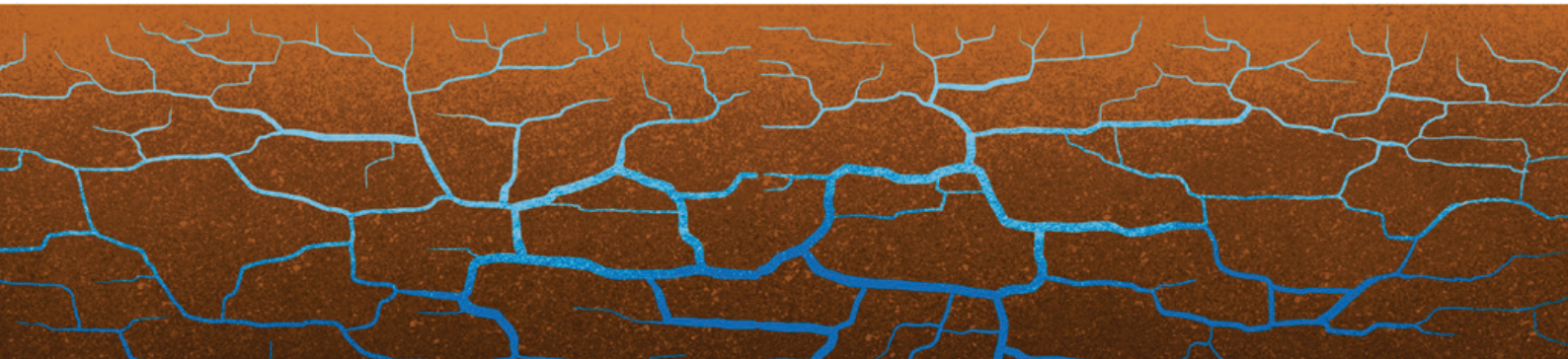
Renforcer et actualiser les bases de connaissances

UNESCO-PHI
Bruce Misstear* et Alice Aureli

IGRAC
Arnaud Sterckx, Claudia Ruz Vargas, Konstantin Scheihing et Neno Kukurić

Avec les contributions de Viviana Re (AIH), Christina Copeland (CDP), Aldo Fiori et Christophe Cudennec (AISH), Kerstin Danert (Ask for Water GmbH pour le compte du Réseau d'approvisionnement en eau en milieu rural)

* affilié au Trinity College, Université de Dublin



9.1 Introduction

La prise de décisions efficaces et pérennes nécessite de disposer de solides connaissances sur les eaux souterraines. Depuis qu'elle a acquis le statut de science au XIXème siècle, l'hydrogéologie s'appuie sur un ensemble de méthodes et d'outils visant à évaluer les ressources en eaux souterraines à différentes échelles et dans différents contextes environnementaux et sociétaux.

Les données sur les eaux souterraines, issues d'une surveillance régulière, permettent d'identifier les tendances et les motifs propres aux systèmes de nappes souterraines, lesquels sont indispensables à la modélisation et à la simulation des processus actuels, ou pour prédire les conditions futures par le biais de l'analyse de scénarios. Les résultats des calculs de modélisation devraient toujours s'accompagner d'analyses d'incertitude. Les données recueillies et les informations obtenues doivent être partagées avec tous ceux qui dépendent des nappes souterraines ou qui prennent part à leur gestion. Par ailleurs, la constitution d'une base de connaissances et l'emploi de celle-ci sur le terrain ou lors des décisions de gestion exigent une bonne formation des experts en eaux souterraines.

La prise de décisions efficaces et pérennes nécessite de disposer de solides connaissances sur les eaux souterraines

Si l'évaluation de l'état des nappes souterraines nécessite des données suffisantes et fiables, l'obtention de celles-ci peut souvent s'avérer ardue. Toutefois, les progrès importants réalisés dans le domaine de l'hydrogéologie ont permis une compréhension générale des propriétés des aquifères de même que des principes physiques et chimiques déterminant l'écoulement des eaux souterraines et la circulation des contaminants. Dans le même temps, diverses méthodes et outils de collecte et d'analyse de données ont été élaborés (les tests d'aquifères, la géophysique, les relevés hydrologiques et hydrochimiques, la modélisation numérique par exemple). Bien qu'il existe encore des questions scientifiques qui exigent une attention particulière, la recherche dans ce domaine avance à grands pas, ouvrant de nouvelles perspectives à l'hydrogéologie et réduisant, à travers une approche interdisciplinaire, le fossé qui la sépare d'autres disciplines tels les sciences environnementales, la sociologie, les soins de santé, l'économie, le droit et la politique. En outre, le renforcement de la coopération entre les différentes parties prenantes, au moyen d'approches transdisciplinaires telles que la socio-hydrogéologie, attire davantage d'intérêt (Re, 2015 ; Hynds et al., 2018). Aujourd'hui, le savoir scientifique en hydrogéologie comme les méthodes et outils disponibles sont suffisants pour résoudre la plupart des problèmes de gestion des nappes souterraines qui se posent, notamment pour le choix de l'emplacement des puits, l'optimisation des extractions et la prédiction de leurs effets à l'échelle locale et régionale, la prévention de la contamination, etc. La difficulté tient davantage au manque de données fiables aux fins de l'évaluation des nappes souterraines et de l'analyse de scénarios spécifiques sur une zone donnée, en particulier dans les pays à faible revenu, ainsi que la diffusion limitée des données, des informations et des savoirs parmi les chercheurs, les praticiens et les décideurs.

9.2 Étude des nappes souterraines : caractérisation et évaluation

Étant donné le caractère unique de chaque aquifère et de ses conditions limites, il est toujours nécessaire de procéder à des évaluations de l'état des nappes souterraines sur le terrain afin de pouvoir concevoir des politiques et une gestion éclairées des ressources en eaux souterraines. Les études qui se limitent aux systèmes physiques des nappes, tenant compte uniquement des caractéristiques des aquifères (y compris leur alimentation et leur écoulement), sont classées ici dans la catégorie *caractérisation hydrogéologique*. Les études qui comprennent d'autres aspects, soient-ils environnementaux (les écosystèmes dépendant des eaux souterraines par exemple), socio-économiques (la sexospécificité et le coût de l'approvisionnement en eau par exemple), légaux (les réglementations par exemple) et/ou institutionnels (les capacités et les autorisations par exemple), sont décrites ici comme des évaluations du système de nappes souterraines. Les *évaluations des systèmes de nappes souterraines* à l'échelle régionale/continentale/mondiale se fondent principalement sur le regroupement et la mise à l'échelle des évaluations locales.

9.2.1 La caractérisation hydrogéologique

La caractérisation hydrogéologique comprend l'estimation des paramètres et des variables de l'aquifère, à savoir la superficie (profondeur, épaisseur) et les propriétés hydrogéologiques (conductivité hydraulique, coefficient de stockage, etc.). Les variables concernent l'alimentation (la recharge), le déversement (le débit) et l'état de l'aquifère. La recharge provient principalement des précipitations (et des infiltrations provenant des eaux de surface) tandis que le déversement se produit à travers les sources et le débit de base allant vers les eaux de surface, l'évapotranspiration (dans les aquifères peu profonds) et les puits d'extraction. Les principaux paramètres permettant d'établir l'état de l'aquifère sont les niveaux des nappes ainsi que les variables de qualité telles que la température, le pH et la conductivité électrique (un moyen indirect de mesure de la salinité). Le tableau 9.1 présente une liste des paramètres fréquemment inclus dans la surveillance de la qualité des nappes souterraines.

Tableau 9.1

Paramètres fréquemment inclus dans la surveillance de la qualité des nappes souterraines

Paramètres d'état élémentaires	
EC	Conductivité électrique
pH	Acidité
T	Température
NO_3	Nitrate
Cl	Chlorure
Autres paramètres à basse fréquence	
Ca, Mg, Na, K	Cations principaux
Cl, HCO_3, SO_4	Anions principaux
MDT	Matières dissoutes totales
Surveillance microbiologique des sources d'eau potable	
FC	Coliformes fécaux
FS	Streptocoques fécaux
E. Coli	Escherichia coli
Paramètres supplémentaires (requis dans des contextes hydrogéologiques spécifiques)	
F	Fluorure
Fe	Fer soluble
As	Arsenic soluble
Mn	Manganèse soluble
U	Uranium soluble
P	Orthophosphate
NH_4	Ammonium
Paramètres complémentaires (en cas de pressions agricoles ou industrielles spécifiques)	
Pesticides spécifiques	Métaux lourds
Substances organiques volatiles spécifiques	Certains contaminants émergents
Hydrocarbures spécifiques	

Source : adapté de AIH (2017, p. 6).

Puisque le sous-sol est généralement composé de différentes unités géologiques ayant des propriétés hydrauliques différentes, les nappes souterraines peuvent posséder diverses propriétés physiques et chimiques à différents endroits et à différentes profondeurs. La recharge et le débit des nappes souterraines étant des processus complexes qui varient selon l'espace et le temps, des mesures numériques fiables ne peuvent être réalisées qu'à partir d'observations détaillées sur le terrain.

En raison de la diversité et de la complexité des processus qui s'y rattachent, il est souvent difficile de reconnaître le rôle des eaux souterraines et d'en tenir compte au mieux dans les processus de prise de décision

Toutefois, les observations directes des nappes souterraines et du sous-sol se limitent surtout à celles des puits et des sources, où seuls certains paramètres peuvent être mesurés tels le niveau des eaux souterraines, le rendement des puits, le débit des sources et la qualité des eaux souterraines. D'autres données sont estimées par des méthodes indirectes comme les tests de pompage, la géophysique, le tracé par colorants, les méthodes d'estimation de la recharge et la modélisation numérique. Ces estimations comportent une certaine marge d'incertitude et différentes méthodes d'estimation peuvent donner des résultats différents. Cela vaut également pour l'estimation d'une variable aussi importante que la recharge des nappes souterraines (Scanlon et al., 2002 ; Healy, 2010 ; Walker et al., 2019). Les estimations des paramètres hydrauliques tels que la conductivité hydraulique ou le coefficient de stockage peuvent varier dans des proportions qui sont fonction des tests de pompage et des méthodes d'interprétation employées. De plus, certaines variables et certains paramètres sont rarement quantifiés sur le terrain par des méthodes directes ou indirectes : ils sont plutôt extrapolés sur la base des valeurs courantes disponibles dans la littérature publiée sur le sujet. La dispersivité, par exemple, qui est un paramètre contrôlant les processus de diffusion des solutés, est généralement déduite de la lithologie et de l'échelle du processus de diffusion des solutés (Schulze-Makuch, 2005).

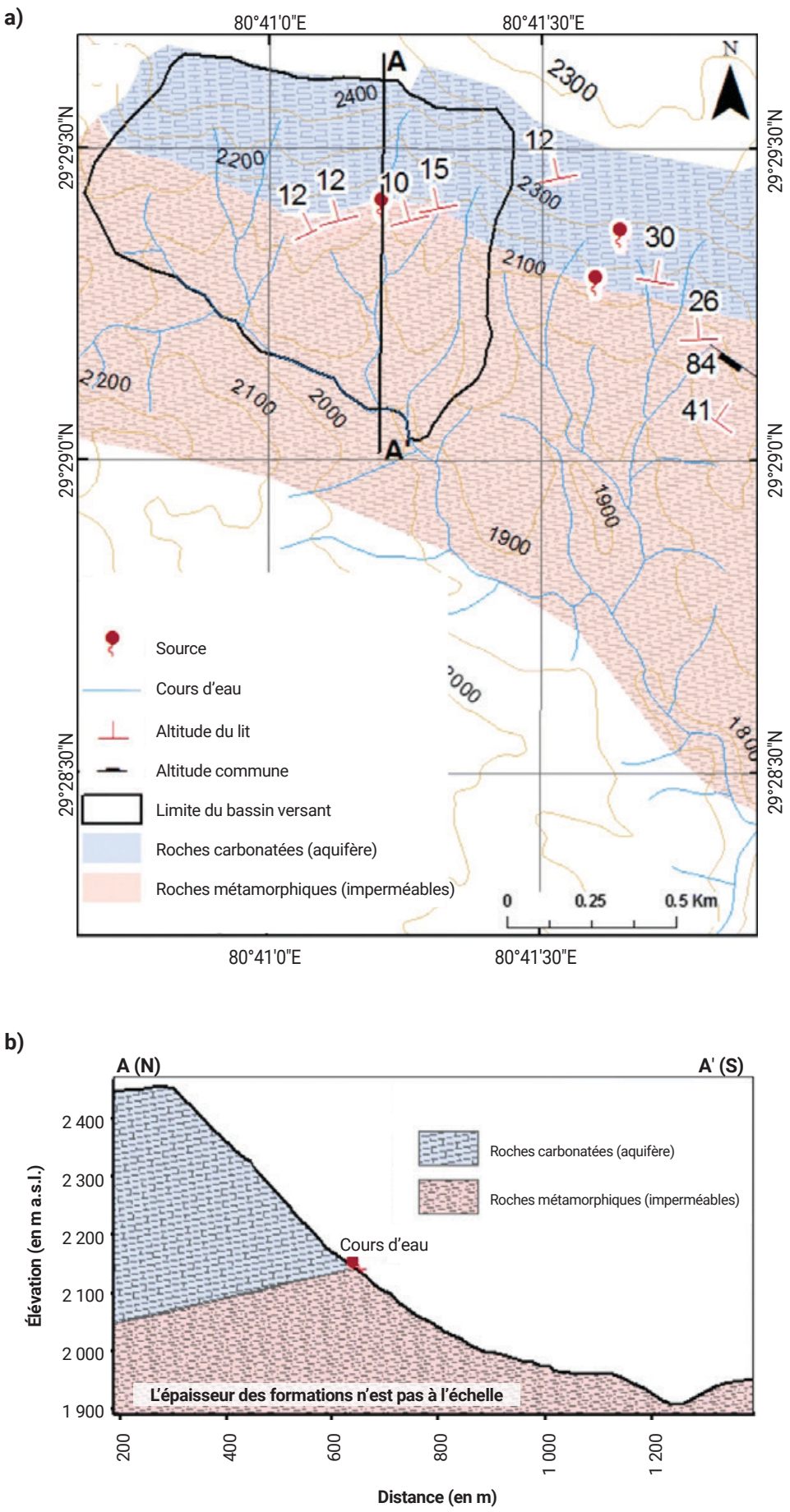
En raison du fait que les données ponctuelles mesurées ou estimées sur le terrain ont une représentativité spatiale limitée, elles doivent faire l'objet, autant que possible, d'une interpolation minutieuse, en se servant d'informations continues et/ou supplémentaires (obtenues par télédétection, géophysique par exemple). La qualité des enquêtes sur le terrain est cruciale pour l'évaluation et il est souvent recommandé d'effectuer un travail de vérification supplémentaire. Les cartes hydrogéologiques et les coupes transversales qui les accompagnent (figure 9.1) sont des éléments nécessaires à toute caractérisation des aquifères.

Outre les données hydrogéologiques, la caractérisation hydrogéologique requiert d'autres informations sur le cycle de l'eau (données météorologiques, données sur les eaux de surface, couvert terrestre par exemple). Il est également indispensable de recueillir des données sur les extractions d'eaux souterraines. Dans les juridictions où les nouveaux forages ou puits doivent être enregistrés, une telle réglementation peut permettre aux autorités de surveiller les extractions d'eaux souterraines. Sur la plupart des formulaires d'enregistrement de puits, il faut indiquer l'endroit où les eaux souterraines seront pompées, par qui, à quelle fin et dans quelles quantités. Il arrive parfois, notamment dans le cas de forages équipés de pompes à rendement élevé, que les propriétaires de puits aient à payer une taxe ou à demander une licence, ce qui est un moyen supplémentaire de contrôler les extractions d'eaux souterraines, tout en en tirant un revenu pour les autorités chargées de la gestion des nappes souterraines. L'enregistrement de nouveaux forages offre une autre occasion de recueillir des données importantes sur les nappes souterraines auprès des propriétaires de puits ou des foreurs, y compris des diagraphies stratigraphiques, des informations sur la qualité et le niveau des eaux après la réalisation du forage ainsi que des résultats de tests sur les puits. Exiger un enregistrement et une homologation des puits peut être difficile, d'autant plus lorsqu'il s'agit de puits illégaux, dont il est difficile et fastidieux de trouver les emplacements. Ce pourquoi il existe de nombreux puits illégaux, en particulier dans les pays en développement, pour lesquels les données ne sont pas souvent recueillies et les extractions échappent à toute surveillance.

9.2.2 Évaluations des systèmes de nappes souterraines

Comme l'ont montré les chapitres précédents, les eaux souterraines jouent un rôle majeur dans de nombreux aspects et processus environnementaux et sociétaux, allant des zones humides à la production alimentaire, de la santé et l'assainissement à la lutte contre le changement climatique. En raison de la diversité et de la complexité des processus qui s'y rattachent, il est souvent difficile de reconnaître le rôle des eaux souterraines et d'en tenir compte au mieux dans les processus de prise de décision. Par conséquent, les systèmes

Figure 9.1
Exemple d'une carte hydrogéologique avec coupe transversale



Source : adapté de Matheswaran et al. (2019, fig. 2, p. 2186).

de nappes souterraines doivent être évalués dans le contexte des enjeux sociétaux et/ou environnementaux pertinents, suivant une approche interdisciplinaire, en complétant la caractérisation hydrogéologique par des analyses environnementales, socio-économiques, voire des analyses politiques et institutionnelles. Outre la fourniture de services (l'approvisionnement en eau pour les foyers, l'agriculture et les industries), les eaux souterraines assurent également des services de régulation (la capacité tampon des aquifères par exemple), des services socioculturels (stations thermales par exemple) et des services d'appui (prévention des affaissements de terrain par exemple) (voir figure 1.3). Tous ces aspects doivent être pris en considération lors de l'évaluation des systèmes de nappes souterraines.

Les données nécessaires à une évaluation interdisciplinaire sont très variées et proviennent de différentes sources. Certaines données sociologiques pertinentes pour des évaluations interdisciplinaires (telles que les considérations sexospécifiques en rapport avec l'approvisionnement en eau) peuvent être recueillies sur le terrain auprès des propriétaires de puits et des utilisateurs des eaux souterraines, en même temps que les données hydrogéologiques. Lors des processus d'évaluation de l'état des nappes souterraines, l'implication des communautés locales encourage l'adoption ultérieure de mesures de gestion des nappes souterraines répondant à leurs besoins, une manière de renforcer la durabilité de telles mesures. Cette démarche est préconisée par le réseau socio-hydrogéologique[34] de l'Association internationale des hydrogéologistes (AIH) (voir également Re, 2015).

9.3 Surveillance des nappes souterraines

9.3.1 La surveillance *in-situ*

La quantité et la qualité des eaux souterraines doivent faire l'objet d'une surveillance sur le long terme afin de connaître le comportement et l'état des aquifères comme de repérer d'éventuels changements négatifs tels que les extractions excessives, la réduction de la recharge (notamment en raison du changement climatique) et la pollution. Les niveaux des nappes souterraines, qui font office d'indicateurs de l'état quantitatif du système, sont surveillés à partir de puits (voir figure 9.2), soit manuellement, soit à l'aide d'enregistreurs automatiques (enregistreurs de données). De plus, les enregistreurs peuvent être équipés de capteurs qui assurent une transmission télémétrique des données vers une base de données. La recharge des nappes souterraines est généralement estimée alors que plusieurs éléments constituant leur débit (extraction par puits, débit des sources, débit de base des rivières) peuvent être en principe mesurés, en utilisant différentes méthodes et dispositifs.

La surveillance de la qualité des eaux souterraines implique le prélèvement d'échantillons d'eau dans les puits et les sources. Les propriétés chimiques d'un échantillon d'eau souterraine pouvant rapidement changer une fois que cette eau atteint la surface, certains paramètres instables (tels le pH et la température de l'eau) doivent être mesurés sur place (à la tête des puits ou à la source) tandis que les analyses complètes sont normalement effectuées à partir des échantillons rapportés en laboratoire. Dans les endroits où ne se trouve pas de laboratoire, des kits de terrain peuvent être utilisés.

Les programmes de surveillance des nappes souterraines doivent être organisés d'après des objectifs bien définis, qui détermineront quels paramètres devront être suivis (voir tableau 9.1), de quelle façon, à quels endroits et à quelle fréquence. Les programmes de surveillance nationaux ont généralement pour objectif de fournir des données sur l'état et les évolutions des nappes souterraines sur le long terme ainsi que des informations aux fins de la planification des politiques en matière d'eau (IGRAC, 2020). Un programme de surveillance de la qualité des eaux souterraines vise à évaluer les changements naturels ou anthropiques qui affectent les propriétés chimiques ainsi que la microbiologie de l'eau. Il pourrait également viser à enquêter sur des problèmes spécifiques liés à la pollution ou sur

[34] Pour plus d'informations, consulter le site : sociohydrogeo.iah.org.

une zone d'étude ciblée. La surveillance préciser à l'échelle locale du débit des sources et du niveau des nappes souterraines est particulièrement importante pour les écosystèmes dépendant des eaux souterraines.

Les programmes de surveillance des nappes souterraines doivent être organisés d'après des objectifs bien définis, qui détermineront quels paramètres devront être suivis, de quelle façon, à quels endroits et à quelle fréquence

Dans de nombreux pays, la surveillance des eaux souterraines incombe aux institutions publiques telles que les ministères en charge de l'eau et les agences de protection de l'environnement (IGRAC, 2020), bien qu'il soit possible que d'autres organismes, notamment les sociétés de distribution d'eau et les instituts de recherche, possèdent leurs propres programmes de surveillance. Toutefois, de nombreux pays à faible revenu ont des réseaux de surveillance très limités ou ne disposent même pas de réseaux de surveillance fonctionnels (SADC-GMI/IGRAC/IGS, 2019a ; IGRAC, 2020), principalement en raison des coûts de lancement, d'exploitation et de maintenance de tels réseaux.

La surveillance des nappes souterraines est difficile en raison des emplacements cachés et de la tridimensionnalité du débit d'écoulement, du temps de déplacement généralement long des eaux et de la complexité de la diffusion des contaminants. Des forages d'observation séparés (voir figure 9.3) ou des groupes de piézomètres, positionnés dans un même forage à différentes profondeurs, peuvent être nécessaires, compte tenu du fait que le niveau des eaux et les gradients hydrauliques peuvent varier entre et au sein des aquifères (Misstear et al., 2017). L'emplacement des puits de surveillance joue également un rôle important. Les échantillons d'eaux souterraines doivent être prélevés à des endroits et des profondeurs spécifiques du fait de l'hydrogéologie (souvent) complexe ; de surcroît, des sources de pollution proches ou les méthodes de construction des forages de surveillance peuvent fortement influer sur les résultats obtenus. En outre, la fréquence des observations doit être bien définie selon les objectifs de surveillance et les caractéristiques chronologiques supposées de la variable mesurée. Le niveau des nappes souterraines doit être enregistré à des intervalles suffisamment réguliers afin d'identifier les variations saisonnières et les évolutions à long terme découlant de l'évolution des rythmes d'extraction ou des variations

Figure 9.2

Piézomètre moderne équipé d'un enregistreur de données et d'une fiche explicative pour le public (Parc national De Alde Feanen, province de Frise, Pays-Bas)

Photographie : Claudia Ruz Vargas.

climatiques. La fréquence d'échantillonnage dépendra également du système d'écoulement des nappes souterraines et des perturbations qu'entraine l'emploi des terres sur la qualité de celles-ci. Les aquifères très vulnérables, qui fournissent des services à la population et à l'environnement, doivent faire l'objet d'une surveillance accrue. Pour toutes ces raisons, les programmes de surveillance des eaux souterraines doivent être conçus soigneusement et fondés sur des connaissances hydrogéologiques, notamment un modèle conceptuel suffisamment détaillé de l'aquifère considéré.

Les techniques de télédétection ont aussi été employées par la communauté scientifique en vue de renforcer la surveillance et l'évaluation des ressources en eaux souterraines

Malgré son coût relativement élevé, la surveillance demeure un investissement judicieux : la détection des problèmes à un stade précoce peut s'avérer particulièrement avantageuse financièrement (Kim et Kim, 2019) et permettre de mettre en place des mesures d'atténuation avant que les ressources ne se détériorent gravement.

Les programmes de surveillance conventionnels peuvent être complétés par des projets de science participative, par lesquels des bénévoles effectuent des mesures et prélèvent des échantillons supplémentaires[35]. L'échantillonnage manuel peut s'appuyer sur de nouvelles technologies telles que les applications smartphones pour le recueil de données, ce qui rend désuète l'utilisation de formulaires papier et réduit les erreurs dans le traitement des données. La science participative ne consiste pas seulement à effectuer des mesures : la participation du public (à travers des entretiens semi-structurés par exemple) et le renforcement des capacités pour les mesures sur site peuvent contribuer à l'intégration d'un savoir-faire local dans les évaluations hydrogéologiques (Re, 2015). Cette approche permet d'éviter une communication à sens unique de la communauté scientifique vers la société civile. Bien qu'elle ait concerné jusqu'à présent le domaine des eaux de surface principalement, la science participative commence progressivement à se tourner vers le domaine des eaux souterraines, notamment par des projets au Liban (Baalbaki et al., 2019) et en Inde (Maheshwari et al., 2014).

Figure 9.3

Groupe de forages pour la surveillance des niveaux de nappe à différentes profondeurs (couches de couverture, substrat rocheux peu profond et profond) sur un site de l'est de l'Irlande

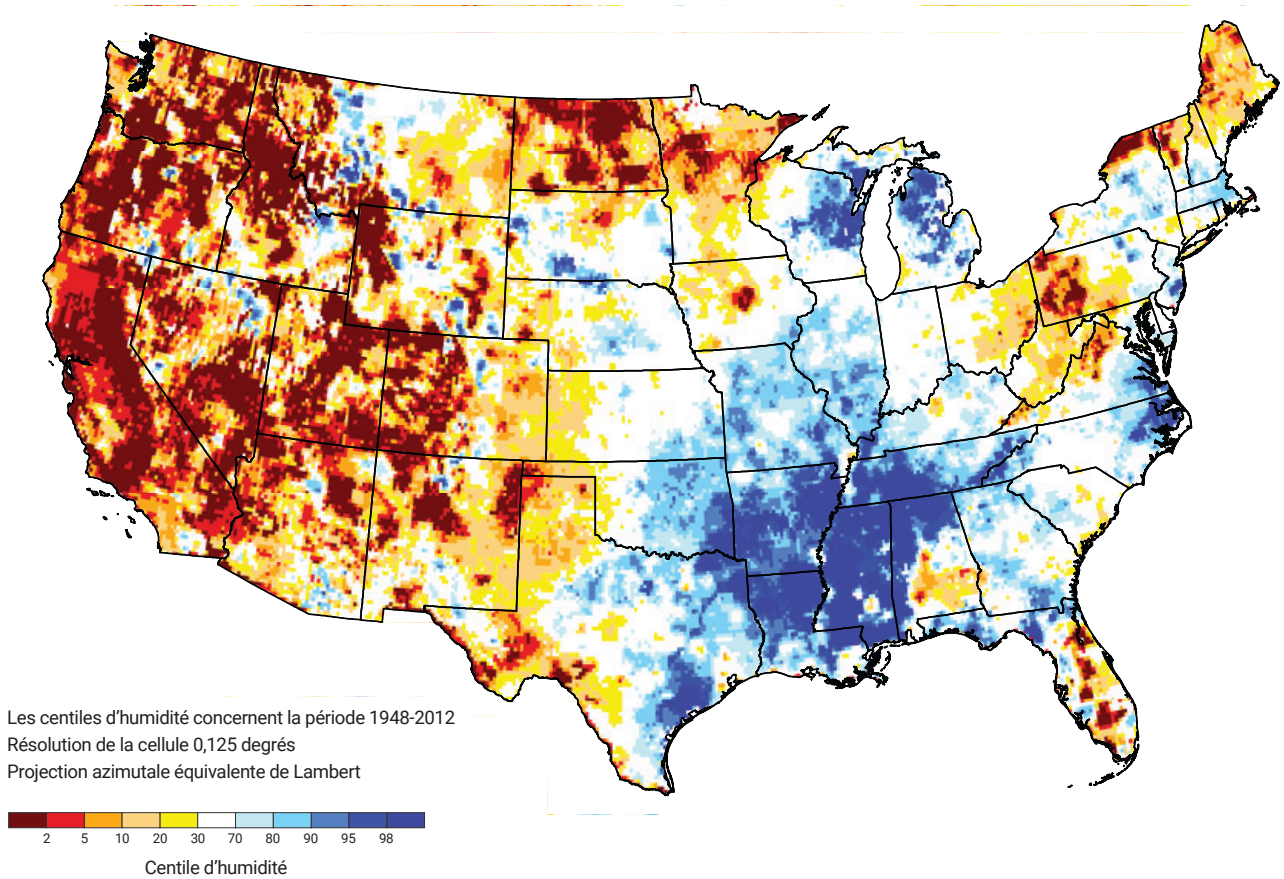
Photographie : Bruce Misstear.

[35] Voir, par exemple, les expériences du projet MARVI sur le site : www.marvi.org.in.

9.3.2 La télédétection

La télédétection (par observations aériennes et par satellite) est couramment utilisée pour étudier et prédire les processus hydrologiques. Étant donné que les variations dans les masses d'eaux de surface peuvent être détectées directement à partir de points d'observation à distance, la télédétection a trouvé un champ d'application dans les sciences hydrologiques et la gestion des fleuves et lacs. Les techniques de télédétection ont aussi été employées par la communauté scientifique en vue de renforcer la surveillance et l'évaluation des ressources en eaux souterraines (Güntner et al., 2007 ; Scanlon et al., 2002, 2012b ; Shamsudduha et al., 2017). Fait notable, les résultats de la mission GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) en ont révélé les potentiels en tant que source supplémentaire d'information sur les variations du stockage des eaux souterraines et ont été utilisés, en combinaison avec des systèmes de modélisation, afin d'obtenir divers résultats tels des indicateurs de sécheresse (voir figure 9.4).

Figure 9.4 Indicateur de sécheresse des nappes phréatiques aux États-Unis, sur la base d'informations issues de la mission GRACE



Source : NASA/NDMC (2021).

L'objectif scientifique principal de la mission GRACE est de mesurer les variations dans le champ gravitationnel de la Terre. Ces mesures peuvent servir à établir la variation totale du stockage de l'eau (ΔTWS) sur Terre (Rodell et al., 2018). En déduisant de la variation totale du stockage de l'eau, la variation du volume d'eau stocké dans les autres composantes terrestres du cycle de l'eau (à savoir l'humidité du sol, les rivières, les lacs et les réservoirs, la glace et les glaciers) pour la même période, on peut estimer la variation du stockage des eaux souterraines (ΔGWS).

La principale limite à l'application des résultats de GRACE est la faible résolution des données satellitaires. De plus, comme ΔGWS est calculée indirectement, son calcul peut comporter une accumulation d'erreurs provenant des autres composantes considérées, dont certaines sont estimées par modélisation[36]. En dépit de ces lacunes, cette méthode a été utilisée en combinaison avec d'autres sources de données afin d'améliorer la précision des estimations de la variation du stockage des eaux souterraines. L'actuel projet Global Gravity-based Groundwater Product (G3P)[37] fournira un ensemble de données mondiales, cohérentes et librement accessibles sur la variation du stockage des eaux souterraines.

Bien que les satellites ne donnent pas d'indications directes sur la qualité des eaux souterraines, ils sont en mesure de fournir des informations sur l'emploi des terres et la géologie, lesquelles peuvent avoir un lien avec la qualité des eaux et à leur vulnérabilité à la pollution. Qui plus est, les résultats de télédétection peuvent être utilisés comme variables supplémentaires afin d'étayer la modélisation prédictive. Par exemple, les prévisions concernant certains contaminants peuvent être déduites d'informations sur les activités anthropiques, comme ce peut être le cas avec les problèmes de salinité des sols causés par l'irrigation intensive (WWQA, 2021 ; PNUE, 2020). De même, les informations sur l'affaissement des sols recueillies par télédétection (à l'aide d'un radar interférométrique à synthèse d'ouverture par exemple — InSAR) peuvent être rapportées à la variation du niveau des nappes souterraines et à l'exploitation de celles-ci.

9.4 Analyse prédictive et incertitude des prévisions

Les données sur les variables du système de nappes souterraines, recueillies dans le temps au moyen de la surveillance, sont utilisées pour identifier les évolutions et les schémas de fonctionnement des aquifères

Les données sur les variables du système de nappes souterraines (niveau des eaux souterraines ou salinité par exemple), recueillies dans le temps au moyen de la surveillance, sont utilisées pour identifier les évolutions et les schémas de fonctionnement des aquifères. Ces informations sont indispensables pour tenter de prévoir les variations futures de la quantité et de la qualité des eaux souterraines. Cette prévision est souvent effectuée grâce à une analyse prédictive, en utilisant une modélisation numérique par laquelle les résultats de diverses introductions ou interventions dans le système de nappes souterraines sont testés et analysés.

Tant les modèles numériques déterministes que stochastiques (probabilistes) sont utilisés dans une analyse prédictive. Un modèle déterministe est basé sur un modèle conceptuel hydrogéologique, qui est une simplification d'un environnement souterrain souvent complexe, et simule l'écoulement et la diffusion à travers cet environnement. Un modèle stochastique s'intéresse principalement aux variables (entrée, état et sortie), en développant divers algorithmes (grâce au « machine learning ») afin de reproduire les processus qui les relient. Les modèles stochastiques sont très utilisés en hydrologie des eaux de surface, en raison de la disponibilité des données et des temps de réponse rapides du système. Ces avantages, ainsi que la complexité des environnements hydrogéologiques, sont les deux principales raisons qui justifient le recours aux modèles stochastiques pour la modélisation des systèmes de nappes souterraines karstiques.

Les modèles numériques déterministes, basés sur les propriétés physiques et chimiques de l'environnement, sont des outils puissants pour simuler et prévoir l'état d'un aquifère selon divers scénarios. Cependant, il faut souligner que toute modélisation est une simplification du monde réel et qu'elle comporte un certain degré d'incertitude, qui dépend de plusieurs facteurs, notamment du nombre et de la complexité des processus physiques et chimiques simulés, de l'hétérogénéité du sous-sol, de la qualité et de la quantité des données d'entrée ainsi que de la calibration du modèle. Cette marge d'incertitude peut être importante ; il convient donc de toujours l'évaluer et de la communiquer avant d'utiliser les résultats d'une modélisation. Du fait des progrès en matière de capacités de calcul et d'algorithmes, il est possible (et fortement recommandé) de réaliser des analyses d'incertitude grâce auxquelles le niveau de fiabilité des prévisions de la modélisation peut être estimé.

---

[36] Une étude récente de Shamsudduha et Taylor (2020) a montré que la marge d'incertitude des estimations de la variation du stockage des eaux souterraines, calculées à partir des résultats de GRACE pour 37 systèmes aquifères, varie entre 36 % et 219 %.

[37] Pour plus d'informations, consultez le site www.g3p.eu.

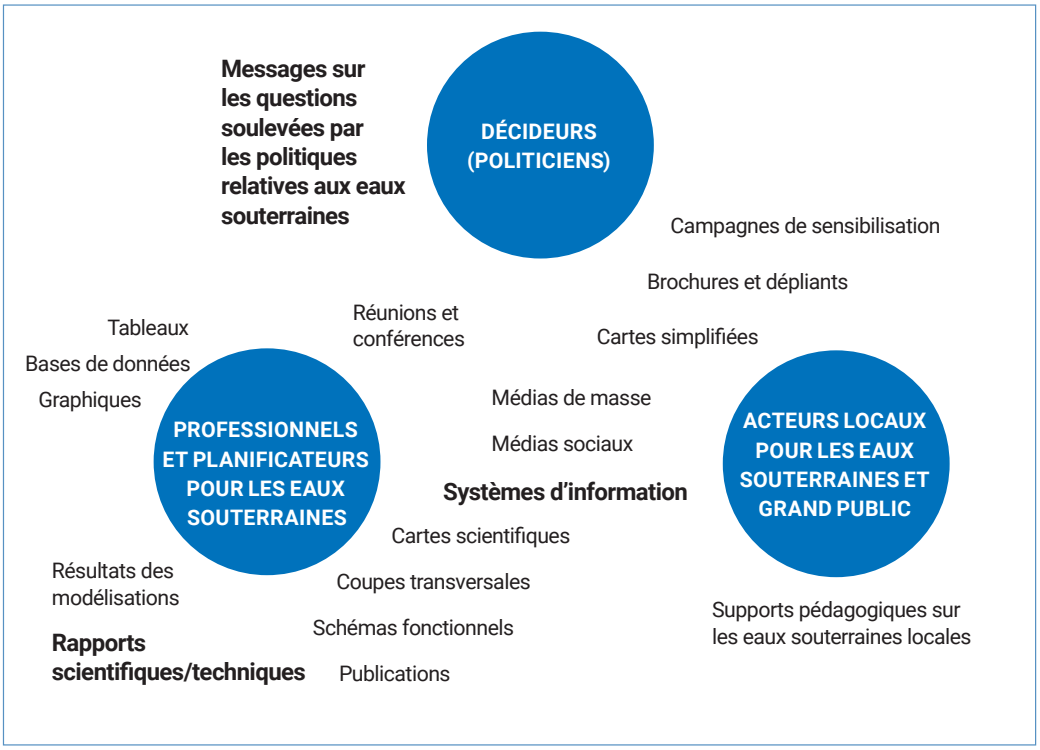
Quelle que soit la modélisation utilisée, une analyse prédictive nécessite une bonne compréhension des forces anthropiques et environnementales qui ont un impact sur les systèmes de nappes souterraines et de la façon dont elles peuvent évoluer. De nos jours, les modélisations de nappes souterraines sont également utilisées au sein de modélisations hydroéconomiques beaucoup plus complexes, dans lesquelles les analyses prédictives non seulement regroupent les résultats de divers modèles mais traitent une diversité de sujets et de questions.

9.5 Partage des connaissances et renforcement des capacités

L'apport des données et des informations se trouve décuplé lorsque celles-ci sont partagées entre les communautés et les organisations qui sont, ou pourraient être, concernées par l'utilisation, la protection, le développement et la gestion des nappes souterraines, ou par le financement de ces activités. La connaissance de l'état des nappes souterraines est la première condition d'une gestion durable et efficace de cette ressource. Il existe un grand nombre de communautés et d'organisations qui s'intéressent aux nappes souterraines et chacune d'entre elles a des besoins en information différents, à différentes échelles, qui peuvent aller des aquifères locaux aux systèmes aquifères, et des bassins fluviaux ou lacustres à d'autres unités géographiques telles que les pays, les sous-régions ou les continents. Il est donc nécessaire de rassembler les informations et les connaissances sur les nappes souterraines à l'échelle régionale, nationale et mondiale afin de comprendre leur rôle et leur impact dans le contexte de défis sociétaux et environnementaux interdépendants. Les impacts du changement climatique (les sécheresses, l'élévation du niveau de la mer par exemple), la production et le commerce alimentaires, les conflits et les migrations sont autant d'exemples de processus et de questions qui nécessitent des politiques cohérentes en matière d'eaux souterraines à de multiples niveaux. Par conséquent, l'information sur les nappes souterraines doit être adaptée selon ses différents destinataires. Comme l'illustre la figure 9.5, ceci peut se faire grâce à différentes formes de diffusion, qu'il s'agisse de rapports scientifiques, de chaînes documentaires, de publications sur les réseaux sociaux, de brochures ou de conférences (Re et Misstear, 2018).

Figure 9.5

Différentes formes de diffusion des données et des informations sur les nappes souterraines selon les utilisateurs envisagés



Source : Van der Gun (2018, fig. 10.4, p. 207).

Si le partage d'informations est préconisé depuis longtemps (Principe 10 de la Déclaration de Rio, 1992, par exemple), l'importance du partage et de l'ouverture des données a également été reconnue (par la directive INSPIRE de l'UE, 2007, par exemple). Le partage des données et des informations n'en reste pas moins déficient, en particulier dans les pays à faible revenu. L'accès aux données peut être difficile et pas nécessairement public (SADC-GMI/IGRAC/IGS, 2019a). Ceci peut être dû à des questions techniques (lacunes dans la collecte des données, bases de données obsolètes et capacités limitées en matière de technologies de l'information), mais il existe aussi une réticence à partager certaines données « sensibles » ou à le faire de façon gratuite. Pourtant, les données sur les nappes souterraines obtenues grâce à des fonds publics devraient être disponibles publiquement.

De même, les entreprises privées devraient publier les données et informations pertinentes concernant les caractéristiques des nappes souterraines, ce qui permettrait d'améliorer l'évaluation et la gestion de ces dernières. Par exemple, les données géophysiques et de forage collectées lors de l'exploration pétrolière et gazière pourraient permettre d'enrichir les connaissances sur l'étendue et les caractéristiques des aquifères. De plus, les sociétés minières communiquent de plus en plus sur la manière dont elles emploient l'eau (Northey et al., 2019). Les grands producteurs internationaux de boissons et d'eau en bouteille s'exposent à une publicité négative s'ils sont associés à l'épuisement et/ou à la pollution des aquifères dans des contextes où il n'existe aucune transparence quant à l'état de l'aquifère et aux pressions, impacts et tendances connexes. Cela devrait inciter les entreprises à évaluer les risques qu'elles encourent de même qu'à utiliser les eaux souterraines d'une manière durable, en se basant sur des données probantes, et à partager les données relatives à l'eau dont elles disposent.

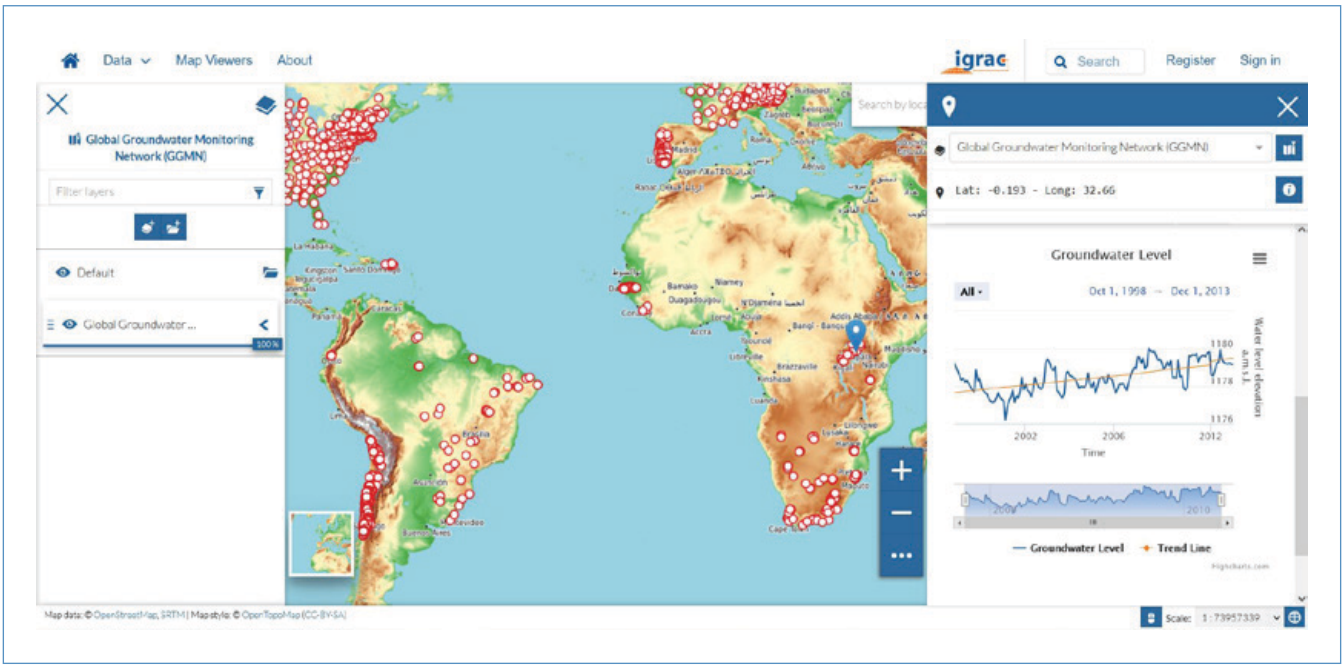
Dans de nombreux pays à revenu faible ou intermédiaire, les capacités hydrogéologiques font défaut, même lorsque les nappes souterraines apportent la plus grande partie des ressources en eau gérées nationalement

De plus, si elles veulent perdurer, les entreprises commerciales doivent voir plus loin que les opérations sur site et apporter leur contribution à l'amélioration de la gouvernance à l'échelle de l'aquifère. Défendue par de grandes entreprises, cette démarche est appelée « gérance de l'eau ». Selon une enquête du CDP, 64 % des entreprises déclarantes avaient diminué, ou maintenu, leurs prélèvements d'eau selon une comparaison annuelle entre les années 2019 et 2020. Néanmoins, peu d'entreprises acceptent de rendre compte de ces informations et la surveillance des rejets d'eaux usées est loin d'être suffisante. Un nombre de plus en plus grand d'entreprises prennent en compte les problématiques liées à l'eau dans leurs objectifs commerciaux, leurs stratégies et leur planification financière à long terme. En dépit de tout cela, les exemples d'investissements en capital réalisés pour réduire la consommation d'eau potable et les risques de pollution sont beaucoup moins nombreux. La surveillance de l'utilisation des eaux souterraines et la diffusion de ses résultats, l'évaluation minutieuse des risques environnementaux et la gérance active de l'eau sont les principaux paramètres permettant de distinguer le *greenwashing* d'une gestion responsable et éthique d'une entreprise (IGRAC, 2016). Lancée en partenariat avec l'Organisation des Nations Unies, les gouvernements, les organisations de la société civile et d'autres parties prenantes[38], l'initiative CEO Water Mandate cherche à faire face aux défis mondiaux relatifs à l'eau grâce à la gérance responsable de cette ressource par les entreprises.

Les campagnes de sensibilisation en faveur de la consultation publique des données se multiplient et des dispositifs de mise en ligne sont créés afin de favoriser le partage des données et des informations sur les eaux souterraines. Par ailleurs, le nombre de plateformes web permettant d'accéder aux données et informations sur les eaux souterraines ne cesse de croître aux niveaux national et international. Il en existe plusieurs exemples internationaux comme le portail d'information sur les eaux souterraines de la Communauté de développement de l'Afrique australe (SADC), l'Atlas des eaux souterraines en Afrique et les archives documentaires (réalisés par le Service géologique britannique) et le Système mondial d'information sur les eaux souterraines (GGIS) développé par le Centre international d'évaluation des ressources en eaux souterraines (IGRAC – voir figure 9.6).

[38] Pour plus d'informations sur le CEO Water Mandate, consulter le site ceowatermandate.org.

Figure 9.6 Système mondial d'information sur les eaux souterraines (GGIS)



Source : IGRAC (n.d.).

La diffusion des données scientifiques sur les eaux souterraines se fait de plus en plus par le biais de publications en accès libre, notamment des articles de journaux, des manuels et des guides. À ce propos, il faut noter l'initiative du Groundwater Project[39], qui défend le libre accès aux connaissances sur les eaux souterraines par des livres et d'autres documents éducatifs publiés en ligne. Il est important de partager les connaissances scientifiques avec tous, en particulier dans les pays à faible revenu où le prix des livres et des abonnements aux revues scientifiques peut empêcher l'accès aux informations scientifiques.

Compte tenu de l'importance croissante des ressources en eaux souterraines dans le contexte du changement mondial, les spécialistes en eaux souterraines devraient non seulement enrichir les bases de connaissances mais aussi contribuer à l'élaboration des politiques et participer aux prises de décision. Toutefois, leur contribution potentielle n'est pas toujours prise en compte (Gleeson et al., 2020b ; Gorelick et Zheng, 2015). Les organisations impliquées dans la gestion des nappes souterraines telles que les services de distribution d'eau, les agences de fourniture de services d'eau, d'assainissement et d'hygiène (WASH), les organisations de gestion des bassins fluviaux et les agences environnementales, gagneraient à impliquer les hydrogéologues dans l'élaboration de leurs activités.

Dans de nombreux pays à revenu faible ou intermédiaire, les capacités hydrogéologiques font défaut, même lorsque les nappes souterraines apportent la plus grande partie des ressources en eau gérées nationalement (Foster, 2020). Ce déficit de capacités se manifeste aussi bien au niveau des individus que des institutions (Abdolvand et al., 2015 ; Albrecht et al., 2017). Les lacunes institutionnelles en matière de gouvernance et de gestion des eaux souterraines compromettent, à leur tour, la sécurité hydrique (ONU, 2018). Des programmes de renforcement des capacités, financés de façon adéquate, constituent donc une étape essentielle pour sortir du cercle vicieux de la surexploitation des nappes souterraines et de la dégradation de l'environnement, et créer un cercle vertueux, consistant à faire émerger localement des défenseurs des eaux souterraines, qui réussiront à favoriser des pratiques de

[39] Pour plus d'informations, consulter le site : gw-project.org.

gestion durable et à renforcer les capacités institutionnelles (Ortigara et al., 2018 ; Jadeja et al., 2018 ; Taylor et al., 2012b). C'est ainsi que la cible 6a de l'objectif de développement durable 6 fait de la coopération internationale et du renforcement des capacités, des facteurs clés dans l'établissement d'une gestion durable des ressources en eau.

Afin de garantir que les mesures de renforcement des capacités ont un impact durable, les différentes activités doivent être conçues pour un groupe cible, offrir des perspectives interdisciplinaires, permettre un retour de la part des participants et disposer de mécanismes de vérification (Re et Misstear, 2018 ; Ferrero et al., 2019). Parmi les cadres exemplaires qui favorisent le renforcement des capacités institutionnelles, on peut distinguer les partenariats communaux binationaux ou les accords de coopération gouvernementaux impliquant les agences spécialisées concernées. Cela peut également comprendre la création de centres d'excellence nationaux ou régionaux dans le pays bénéficiaire. Pour réussir sur le plan institutionnel grâce au renforcement des capacités hydrogéologiques, il faut généralement fournir des efforts constants et mettre en place des programmes de développement qui permettent aux nouveaux défenseurs des eaux souterraines, au niveau local, de mettre leur expertise à profit. À plus petite échelle, la formation des personnes peut être améliorée à travers des programmes d'échanges universitaires bilatéraux ou des formations post-doctorales.

Chapitre 10

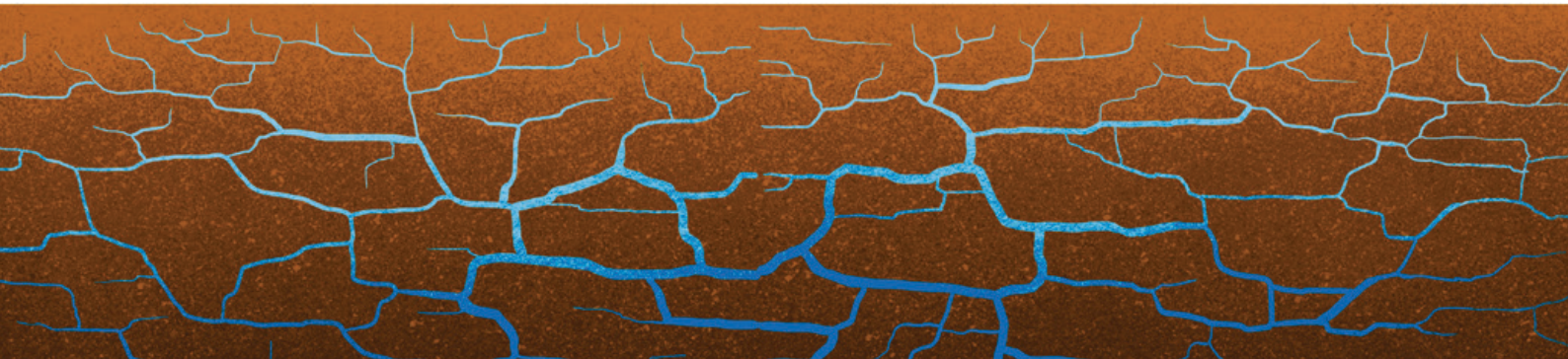
Politiques et planification relatives aux eaux souterraines

PNUD
Jenny Grönwall* et Marianne Kjellén

Avec les contributions de Gabriel Eckstein (École de droit de l'Université A&M du Texas), Kerstin Danert** et Lesha Witmer (WfWP), Rebecca Welling (UICN), Viviana Re (AIH), Katharina Davis (PNUD) et Lulu Zhang (UNU-FLORES)

* À la demande de la Facilité pour la gouvernance de l'eau PNUD-SIWI sous l'égide de l'Institut international de l'eau à Stockholm

** Ask for Water GmbH pour le compte du Réseau d'approvisionnement en eau en milieu rural



Les politiques relatives aux eaux souterraines définissent des objectifs, des ambitions et des priorités pour la gestion des ressources en eaux souterraines dans l'intérêt de la société. La planification permet de traduire les politiques en programmes d'action. Les politiques comme la planification relèvent souvent d'un cadre plus large pour la gestion des ressources en eau, mais les défis propres aux eaux souterraines reçoivent généralement moins d'attention que les eaux de surface.

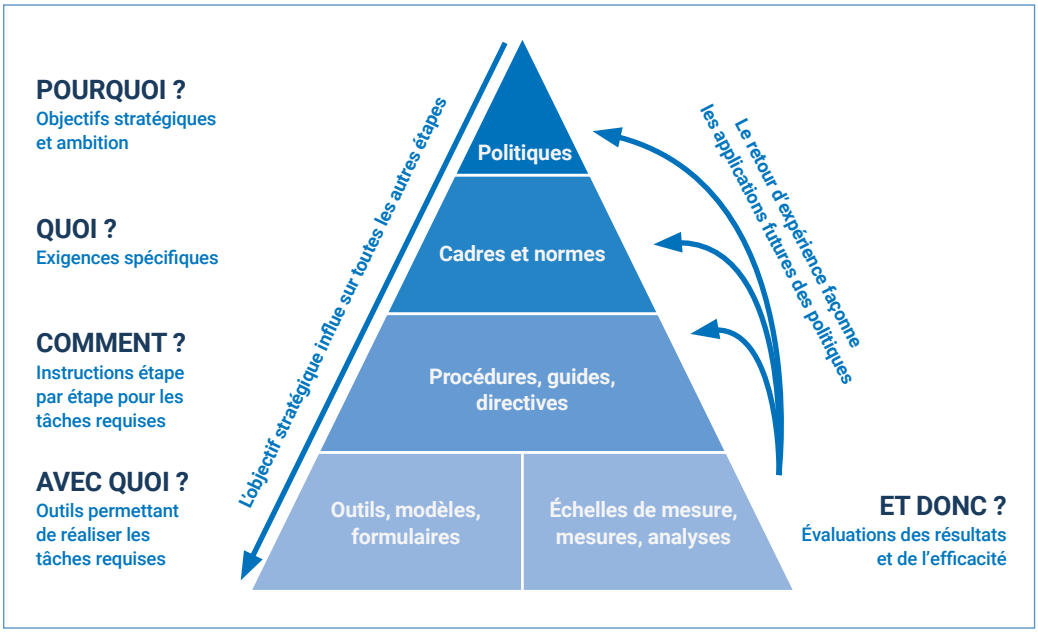
Les termes « politique », « stratégie » et « plans » sont utilisés indistinctement dans de nombreux pays et contextes.

10.1 Les politiques relatives aux eaux souterraines

Les politiques se veulent le reflet de valeurs et d'idées considérées comme étant dans l'intérêt public. À partir de principes formulés en termes généraux, un document de politique générale fixe des objectifs stratégiques, énonce les raisons de leur importance et définit des exigences spécifiques pour orienter la conduite des actions présentes et futures (Torjman, 2005 ; De Sousa et Berrocal Capdevila, 2019). La figure 10.1 indique la manière dont la politique générale est liée à des exigences spécifiques (le « quoi ? »), à des procédures, des guides et des directives (le « comment ? ») et à des outils d'exécution (le « avec quoi ? »), déterminant comment traduire les politiques en actions (De Sousa et Berrocal Capdevila, 2019 ; Smith, 2003).

Figure 10.1

Qu'est-ce qu'une politique ? Un modèle de l'État de Nouvelle-Galles du Sud (Australie)



Source : De Sousa et Berrocal Capdevila (2019).

Dans un contexte national, les « décideurs politiques » sont généralement une instance publique élue ou désignée, qui a pour mandat la définition des politiques et de leur portée. Les États fédéraux disposent souvent de politiques relatives aux eaux souterraines au niveau national et au niveau fédéral. Les politiques peuvent être destinées principalement aux autorités, aux organisations, aux juridictions et aux organisations non gouvernementales, et se rapporter à leurs mandats.

L'élaboration des politiques nécessite de faire des choix sur les moyens les plus appropriés d'atteindre un objectif souhaité. On peut s'appuyer sur des principes économiques (voir figure 13.1) pour réaliser ces choix, principes qui assignent une valeur aux ressources en eaux souterraines (Smith et al., 2016). Les valeurs et principes instrumentaux, intrinsèques et relationnels sont également essentiels pour défendre l'éthique environnementale, les besoins humains ainsi que les valeurs culturelles et historiques (voir la figure 2.1 ; ONU, 2021).

La première étape consiste à déterminer une « vision de la gestion des eaux souterraines » nationale, qui s'inscrive dans une vision nationale des ressources en eau, en concertation avec des acteurs allant des utilisateurs et techniciens locaux aux scientifiques, décideurs politiques et investisseurs, pour catalyser et gérer les changements nécessaires (Smith et al., 2016), comme en Afrique du Sud par exemple (République d'Afrique du Sud, 2010). Les politiques relatives aux eaux souterraines doivent dépendre du statut juridique et du régime de propriété des nappes souterraines (public ou privé), des utilisateurs de l'eau, des caractéristiques des eaux de surface interdépendantes et de l'emploi des terres autour des zones de recharge des aquifères (Foster et Chilton, 2018). Elles doivent également permettre une prise de décision intégrée vis-à-vis des ressources en eaux souterraines et des systèmes aquifères, de même qu'assurer un lien avec d'autres secteurs et domaines de la société au-delà du secteur de l'eau — notamment le développement socio-économique, l'égalité des genres et la réduction de la pauvreté, l'alimentation et l'énergie, les écosystèmes, le changement climatique et la santé humaine.

Les États fédéraux disposent souvent de politiques relatives aux eaux souterraines au niveau national et au niveau fédéral

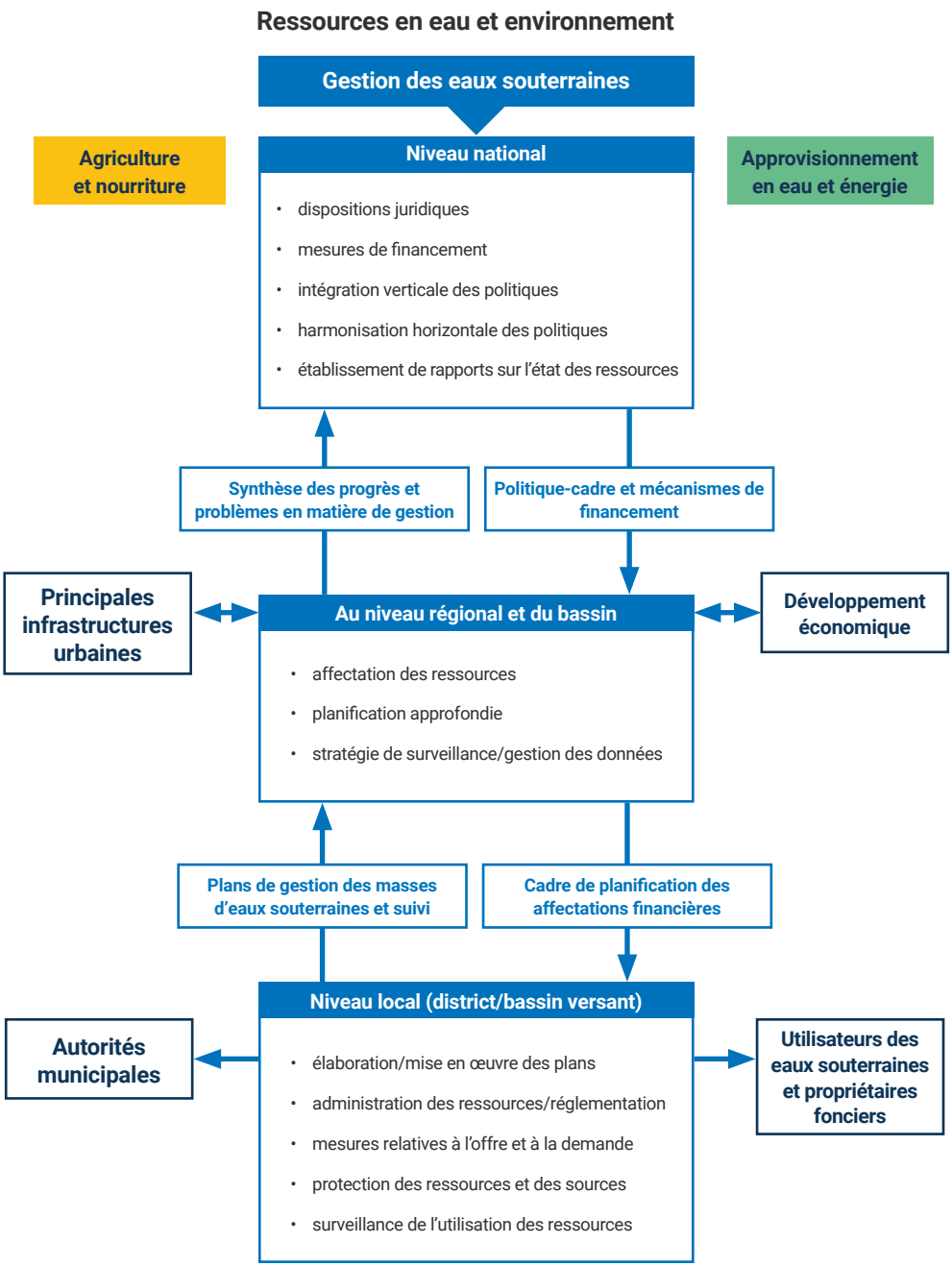
La figure 10.2 représente une structure institutionnelle générique, montrant comment l'élaboration des politiques peut permettre une intégration verticale et horizontale ainsi que des liens avec les secteurs connexes. Les choix et la structure s'inscrivent dans un contexte politique plus large dans lequel des directives et des traités internationaux peuvent fixer des cadres extérieurs. Les recommandations du Projet sur la gouvernance des eaux souterraines (2016c), les règles énoncées par la Directive de l'Union européenne sur les eaux souterraines (Parlement européen/Conseil européen, 2006) ainsi que les Dispositions types sur les eaux souterraines transfrontières (CEE-ONU, 2014) dans le cadre de la Convention sur la protection et l'utilisation des cours d'eau transfrontières et des lacs internationaux de la CEE-ONU (CEE-ONU, 1992) et le Projet d'articles sur le droit des aquifères transfrontières (CDI, 2008 ; voir le chapitre 12) peuvent également guider et influencer l'élaboration des politiques.

Une politique relative aux eaux (souterraines) comprend des normes et des principes directeurs fondamentaux. La durabilité, l'efficacité, l'équité, le principe de précaution, le principe du pollueur-payeur, la gestion conjointe, la gestion de la demande et de l'offre comme de la maintenance, et la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) sont essentiels pour éclairer les décisions futures (Smith et al., 2016). Il est également essentiel de s'assurer que les intérêts des communautés autochtones sont pris en compte, notamment lorsque des concessions sont accordées à des exploitants des nappes souterraines ; pour ce faire, le principe du consentement libre, préalable et éclairé — une composante de la Déclaration des Nations Unies sur les droits des peuples autochtones (Assemblée générale des Nations Unies, 2007) — est primordial. Les éléments de procédure peuvent requérir la participation, la transparence, la responsabilité, la non-discrimination et l'universalité, l'état de droit, la lutte contre la corruption et la subsidiarité. L'approche participative met l'accent sur le rôle central des femmes dans l'approvisionnement en eau comme dans la gestion et la sauvegarde de celle-ci, ainsi qu'établi par les Principes de Dublin (ICWE, 1992). Un ensemble actualisé de principes de valorisation de l'eau a été proposé par le Groupe de haut niveau sur l'eau (2018) et ces principes ont été davantage explicités par l'édition 2021 du *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau : la valeur de l'eau* (ONU, 2021). Les principes de procédures sont également fondamentaux pour l'approche fondée sur les droits humains.

L'Observation générale n° 15 sur le droit à l'eau recommande qu'en matière d'attribution de l'eau, la priorité soit donnée aux usages personnels et domestiques (CESCR, 2002). L'eau potable est donc privilégiée par rapport à d'autres secteurs, par exemple en Afrique du Sud (République d'Afrique du sud, 2010). Après l'élaboration d'une politique, il peut être utile de traduire cette politique en loi, en se fondant sur les termes descriptifs des droits humains afin que l'eau potable ne soit plus seulement un « besoin » mais aussi un « droit » (Mechlem, 2016).

Figure 10.2

Structure institutionnelle pour l'élaboration des politiques relatives aux eaux souterraines



Source : Foster et Chilton (2018, fig. 4,4, p. 87).

Trop souvent, l'adoption de politiques relatives aux eaux souterraines vise principalement à gérer l'emploi de ces eaux à la suite de leur extraction. Cette approche est très éloignée d'une gestion saine de l'*aquifère*, qui doit tenir compte de l'emploi des terres, de la recharge et de la protection des nappes souterraines, et de la mise en œuvre de mesures destinées à préserver les multiples services et fonctions du système de nappes souterraines (voir chapitre 1). Les aquifères, qui font office d'« hôtes » des eaux souterraines, et les sources mêmes de diverses eaux (souterraines) sont distincts mais interconnectés ; ils doivent donc être gérés par des mesures ciblées, bien que complémentaires, prévoyant une utilisation conjointe (Eckstein, 2017 ; Puri et Villholt, 2021).

10.2 Exemples de politiques relatives aux eaux souterraines

En Inde, la politique nationale de l'eau de 2012 stipule que les eaux souterraines « doivent être gérées comme une ressource communautaire détenue, par l'État, en vertu de la doctrine de la fiducie d'intérêt public, afin de parvenir à assurer la sécurité alimentaire, des sources de revenus, le développement équitable et durable pour tous. » (Ministère indien des ressources en eau, 2012, p. 4). Quoiqu'il en soit, l'extraction des eaux souterraines se poursuit généralement sans stricte réglementation ou mise en application (Pandit et Biswas, 2019), là où des intérêts puissants, à peine touchés par les mesures dissuasives imposées par le gouvernement, sont peu enclins à réduire leur utilisation profitable des eaux souterraines. De nombreux États et territoires ont inclus les eaux souterraines dans leurs politiques de l'eau ; par exemple, au Karnataka — un État confronté à une grave détresse agraire et à une pénurie aiguë de l'eau à usage domestique —, la surexploitation des aquifères est largement reconnue, tout comme l'ensemble que forment eaux souterraines et énergie (Kelkar Khambete, 2020). La réalisation des ambitions des politiques est toutefois mise à mal par la partialité des données dans les statistiques officielles. Les puits secs, par exemple, peuvent fournir des informations essentielles sur le stress hydrique au niveau des nappes souterraines, informations qui se retrouvent perdues lors du filtrage des données. Cette lacune compromet les interventions des pouvoirs publics et l'allocation des ressources, comme on l'a constaté dans l'État voisin du Tamil Nadu (Hora et al., 2019).

En Australie, après avoir passé des décennies à s'intéresser principalement aux eaux de surface, le Gouvernement fédéral ainsi que les États, les territoires et les autorités des bassins fluviaux accordent désormais plus d'attention aux nappes souterraines. On peut citer à titre d'exemple la mise à jour de la stratégie sur vingt ans des autorités de la Nouvelle-Galles du Sud (Gouvernement de Nouvelle-Galles du Sud, 2021). Ce document instaure un niveau élevé d'intégration horizontale, les eaux souterraines étant considérées dans leurs liens avec tous les secteurs qui en dépendent et qui ont un impact sur elles.

10.3 Planification de la gestion des eaux souterraines

Un plan (de gestion) des eaux souterraines traduit les politiques en un programme d'action, disposant d'un financement et d'un budget, et peut ainsi fournir un fil conducteur à leur mise en œuvre.

La *planification stratégique* identifie et définit les actions susceptibles de contribuer à la réalisation des ambitions et des objectifs politiques, en particulier en ce qui concerne les systèmes aquifères prioritaires (encadré 10.1). Elle peut également servir à impliquer les parties prenantes dans le processus. Les plans stratégiques sont élaborés afin de promouvoir une gestion de l'eau et une prise de décision rationnelles, efficaces et équitables par rapport aux ressources et aux utilisateurs les plus concernés. La planification tient compte de l'incertitude dans un environnement en évolution afin de répondre aux problèmes futurs connus comme à ceux qui ne peuvent être prédits. Cela nécessite une GIRE et des liens avec tous les domaines pertinents de l'action publique.

La *planification de la gestion opérationnelle* spécifie les interventions et autres activités à mener sur le terrain, y compris leur calendrier. Elle a trait à des aspects tels que les infrastructures d'approvisionnement en eau, les projets de reboisement et la recharge artificielle des aquifères, ainsi qu'aux mesures non techniques liées aux exigences juridiques et politiques, aux directives et aux questions connexes, à savoir notamment qui doit être impliqué et à quel moment. Les plans opérationnels sont plus détaillés que les plans stratégiques et ne couvrent généralement qu'un seul secteur des politiques, ou une partie seulement d'un secteur, mais reconnaissent leurs articulations nécessaires.

Dans les systèmes d'eaux souterraines peu soumis à un stress d'exploitation, les plans conçus pour surveiller les aquifères sans mécanisme de contrôle spécifique seraient appropriés. En revanche, dans les régions de forte sollicitation ou qui connaissent des pénuries d'eau régulières ou à venir, il serait important de disposer de plans détaillant les mesures de contrôle afin de prévenir et gérer les risques de surexploitation (White et al., 2016).

Encadré 10.1 Déroulement concret du processus de planification relatif aux aquifères prioritaires

L'élaboration et la mise en œuvre de plans de gestion des eaux souterraines pour les aquifères prioritaires sont un test ultime de l'adéquation des dispositions de gouvernance et impliquent la série d'actions suivantes, qui seront menées par étape à chaque cycle de gestion adaptative :

- Identification et caractérisation des unités de gestion des eaux souterraines ;
- Évaluation de l'état des ressources, des opportunités et des risques ;
- Obtention d'un consensus sur les services requis de l'aquifère et les objectifs du plan ;
- Élaboration de la stratégie de gestion (y compris les mesures spécifiques, les besoins de surveillance et le financement) ;
- Mise en œuvre de la planification sur une période déterminée, avec suivi systématique, examen de l'efficacité et ajustement lors du prochain cycle.

Source : Projet Gouvernance des ressources en eaux souterraines (2016c, p. 86).

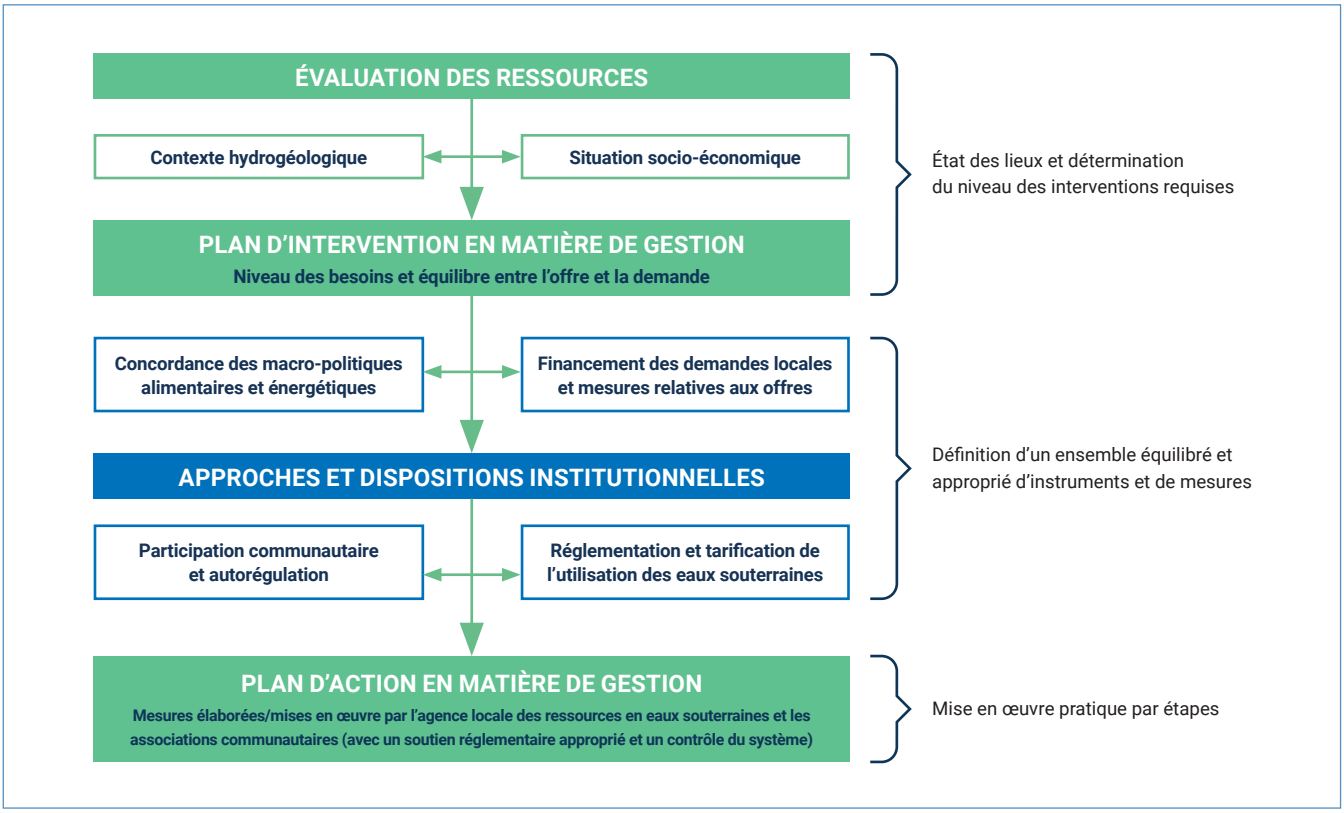
Un plan de gestion des eaux souterraines traduit les politiques en un programme d'action, disposant d'un financement et d'un budget, et peut ainsi fournir un fil conducteur à leur mise en œuvre

Des plans peuvent être élaborés pour traiter spécifiquement des problèmes tels que les risques d'inondation causés par l'élévation du niveau des nappes souterraines, généralement à la suite de précipitations prolongées. Une mesure de substitution pourrait être d'éviter l'épuisement, l'intrusion d'eau de mer et l'affaissement des sols, et/ou de protéger les écosystèmes dépendant des eaux souterraines qui sont vulnérables. La numérisation — notamment les technologies de surveillance de la qualité des eaux souterraines et des systèmes aquifères en temps réel — permet des gains d'efficacité et une optimisation grâce à la collecte et à l'analyse des données, qui sont importantes à chaque étape de la planification de la gestion (UIT, 2010). Par exemple, dans les régions arides, où une méthodologie unifiée pour l'évaluation et la prise de décision est souvent limitée, il pourrait être indiqué d'adopter une approche stratégique pour la planification de la gestion des aquifères basée sur une modélisation des risques (Şen et al., 2013).

Parmi les principales composantes des plans de gestion des eaux souterraines figurent l'inventaire, le diagnostic et la caractérisation des systèmes aquifères ou de certaines de leurs parties (les « unités de gestion ») ; l'évaluation et la hiérarchisation de l'importance du système pour le développement socio-économique et les écosystèmes ; l'estimation des pressions s'exerçant sur le système ; l'implication et la consultation des parties prenantes (Foster et Chilton, 2018). La spécification des interventions et autres mesures de gestion ainsi que celle des impacts attendus de ces mesures sont des composantes supplémentaires. Tous ces éléments sont au cœur de la « gestion adaptative », qui est nécessaire pour relever les défis conjoints du changement mondial et de l'incertitude scientifique autour des ressources en eaux souterraines et des aquifères complexes. La planification de la gestion conjointe des eaux de surface et des eaux souterraines est essentielle pour diversifier les sources d'approvisionnement en eau et accroître la résilience (Grönwall et Oduro-Kwarteng, 2018). Des aspects supplémentaires sont inclus dans la figure 10.3.

Il est important de noter qu'il est attendu des États Membres de l'ONU qu'ils permettent le respect des droits humains à l'eau potable et à l'assainissement par le biais de plans d'action ou de stratégies, accroissant ainsi activement la sensibilisation et les capacités quant à la protection des sources d'eaux souterraines, la nécessité d'un traitement avant consommation et la recharge des nappes souterraines (CESCR, 2002 ; Grönwall et Danert, 2020).

Figure 10.3 Étapes et facteurs de l'élaboration d'un plan de gestion des eaux souterraines



Source : Foster et Shah (2012, fig. 4, p. 10)

Les politiques, stratégies et plans doivent être adaptés au contexte local, en se fondant sur les priorités et les aspirations de la population locale, et s'appuyer sur des données scientifiques fiables

L'élaboration des plans peut résulter d'un effort de coopération entre les ministères nationaux, les agences régionales et locales ainsi que d'autres parties prenantes, sur la base d'un dialogue et d'un soutien technique inclusif (par exemple une cartographie participative) afin de permettre une appropriation conjointe du processus et des résultats. Ce processus doit aboutir à la rédaction d'un document officiel susceptible d'être validé, document définissant des actions réparties dans le temps et des indicateurs pouvant faire l'objet d'un suivi, de même que des bilans dans lesquels les impacts et les résultats peuvent être évalués (Projet Gouvernance des ressources en eaux souterraines, 2016c).

Par des processus ouverts et participatifs de planification dans le domaine des eaux souterraines, il est possible de susciter un soutien plus important de la part du public et une meilleure adhésion aux plans établis et, partant, à la gestion opérationnelle qui en résulte. Une telle planification implique des scientifiques, des spécialistes de la gestion des ressources, les parties prenantes et les décideurs politiques, et devrait être ouverte aux non-spécialistes, les utilisateurs étant invités à y participer (Quevauviller et al., 2016). La planification en matière de gestion des ressources en eaux souterraines concerne autant les organismes gouvernementaux que les utilisateurs finaux, collectivement ou individuellement. À l'échelle locale, la collecte de données et l'analyse des informations seront par nécessité limitées ; pourtant, le renforcement des capacités et la sensibilisation peuvent être bénéfiques à tous les niveaux. De même, les données ventilées par genre et la participation des femmes à la production de données (un sujet généralement réservé aux hommes) sont essentielles pour donner une dimension sexospécifique au processus.

Si un plan de gestion des eaux souterraines et des aquifères peut faire partie d'un plan national de GIRE (GWP, 2017), la planification à l'échelle du bassin doit tenir compte des systèmes dans leur ensemble. En effet, les masses d'eaux de surface et les nappes

souterraines peu profondes sont généralement étroitement interconnectées. Cependant, il convient d'observer que les limites des bassins d'eau souterraine ne coïncident pas toujours avec celles des zones de drainage en surface. De plus, comme tous les aquifères ne sont pas liés hydrologiquement à des rivières ou à des lacs, les relations amont-aval et les dynamiques de pouvoir qui influent sur l'utilisation des eaux de surface et des eaux souterraines peuvent être très différentes (Smith et al., 2016).

Les objectifs nationaux d'une part, et, de l'autre, les objectifs de développement, les priorités, les approches au niveau local tout comme les niveaux d'activité propres à une zone donnée, fournissent des orientations quant au développement, à l'utilisation, à la gestion et à la protection optimales de la ressource comme de l'environnement et des écosystèmes qui y sont liés (Projet Gouvernance des ressources en eaux souterraines, 2016c). Les politiques, stratégies et plans doivent être adaptés au contexte local, en se fondant sur les priorités et les aspirations de la population locale, et s'appuyer sur des données scientifiques fiables.

Un plan doit fixer des objectifs pour la gestion des eaux souterraines et servir de feuille de route pour orienter la mise en œuvre des politiques et des évaluations diagnostiques des ressources. Le plan de gestion doit définir les actions nécessaires pour traiter les problèmes spécifiques aux eaux souterraines ou les pressions que celles-ci subissent, dans des contextes spécifiques, ainsi qu'indiqué, par exemple, dans le tableau 10.1.

Tableau 10.1 Exemples d'actions pouvant être définies par les plans de gestion des eaux souterraines

Types de mesures	Objectif	Exemples
Axé sur la source	Réduction et prévention des impacts à la source ; atténuation	• Autorisations et exigences en matière de licence ; application de la réglementation • Normes de qualité pour le déversement des eaux usées ; contrôle des puits d'injection • Exigences relatives à la gestion sur site et du paysage afin de contrôler la pollution diffuse et non ponctuelle • Incitations financières à la réduction de la pollution • Développement de technologies peu polluantes ou sans déchet • Approches de type « de la source à la mer », « du bassin versant à la côte », « de la crête au récif » afin de s'occuper des flux d'eau, du biote, des sédiments, de la pollution, des matériaux et dess services écosystémiques • Gestion obligatoire et volontaire de la demande pour éviter les prélèvements excessifs
Axé sur les ressources	Gestion de la ressource ; exploitation et maintenance	• Système national de classification des eaux souterraines • Attribution de classes de gestion des eaux souterraines • Définition d'objectifs qualitatifs en fonction des classes de gestion • Établissement de zones de protection de l'eau potable • Utilisation de méthodes adéquates de traitement de l'eau potable • Création d'une réserve volumique pour répondre aux besoins humains fondamentaux et d'une réserve écologique pour protéger les écosystèmes • Contrôle de l'affaissement des sols par la limitation du pompage et la gestion de la recharge des aquifères
Restauration	Restauration de la qualité et de la quantité des eaux souterraines et/ou du stockage des aquifères	• Nettoyage des sites abandonnés • Intervention d'urgence en cas de déversement • Réduction des extractions pour rétablir la réserve • Gestion de la recharge des aquifères, collecte des eaux de pluie et amélioration de l'infiltration • Élaboration d'un modèle physique d'affaissement des sols afin de planifier les stratégies de restauration

Source: à partir de Smith et al. (2016, table 3.1, p. 53).

10.4 Exemples de planification de la gestion des eaux souterraines

La Directive-cadre sur l'eau de l'Union européenne (Parlement européen/Conseil européen, 2000) stipule que les Plans de gestion des bassins hydrographiques constituent le principal outil de présentation de l'état des eaux et des analyses des incidences et des réponses, ainsi que de compte rendu auprès de la Commission européenne. Les parties qui mettent en œuvre l'Accord de Paris dans le cadre de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques mettent en avant leurs actions en faveur du climat dans des plans de contributions déterminées au niveau national (CDN). À ce jour, les eaux souterraines figurent dans les plans soumis par vingt pays et sont mentionnées dans huit d'entre eux, quand le nombre de parties à la Convention est de soixante-quinze (CCNUCC, 2021). Ces plans font référence à la nécessité d'investir dans la capacité tampon des aquifères afin d'accroître les capacités d'adaptation, l'amélioration de la recharge des nappes souterraines, la protection et la gestion de ces nappes comme des zones humides, et la cartographie des risques. Les CDN mentionnent des mesures d'atténuation fondées sur la nature et la technologie, ainsi que des mesures axées sur l'adaptation.

Au Tonga, il existe un risque d'épuisement des nappes souterraines compte tenu du besoin urgent de développement économique, par exemple par l'intensification de l'agriculture (Royaume des Tonga/Groupe de la Banque mondiale/FIDA/PNUD, 2016). La deuxième CDN de l'île (Royaume des Tonga, 2020) identifie la salinisation des nappes souterraines comme un impact possible de l'élévation du niveau de la mer, qui menace de réduire la disponibilité des ressources en eau douce. Parmi les moyens envisagés pour remédier à cette situation figurent les dispositions du plan sectoriel pour l'agriculture du Tonga, qui propose l'évaluation des ressources en eaux souterraines et de leur exploitation actuelle comme l'identification de zones potentielles à protéger. Le plan note également que les années de sécheresse précédentes ont entraîné un regain d'intérêt pour l'utilisation des nappes souterraines à des fins d'irrigation.

En Californie (États-Unis), la loi de 2014 sur la gestion durable des eaux souterraines a donné pour mission aux agences locales de réglementer le pompage en fonction de la recharge des aquifères. Ces agences ont pour mandat de suivre et de surveiller les extractions, et sont tenues de cartographier les zones de recharge des aquifères. La loi exige la planification de l'emploi des terres pour garantir la durabilité par la transparence et l'engagement des parties prenantes ainsi que l'apprentissage au sein des bassins et entre ceux-ci (Kiparsky et al., 2017).

Le point de vue de la Chine sur les politiques relatives aux eaux souterraines et leur planification montre à quel point les deux sont parfois indissociables. Dans la loi sur l'eau de 1988 (République populaire de Chine, 1988), la planification figure dans un chapitre indépendant afin d'en souligner l'importance et le statut juridique. Elle stipule que la planification intégrée de l'eau doit prendre en compte les bassins versants plutôt que les frontières administratives, la planification régionale devant suivre la planification pour les bassins versants, et doit être fondée sur une étude, une enquête et une évaluation scientifiques complètes aux niveaux administratifs pertinents. Cependant, la segmentation prévue entre la gestion de la quantité et de la qualité de l'eau empêche inévitablement une intégration efficace (Liu et Zheng, 2016). Un plan de contrôle de la pollution et de réhabilitation des nappes souterraines ainsi qu'un plan national de prévention et de lutte contre les affaissements de terrain ont fourni des directives officielles pour la gestion des nappes souterraines jusqu'en 2020 (Liao et Ming, 2019). Ces plans et d'autres s'appliquent parallèlement à la politique des « Trois Lignes rouges » de 2012, qui fixe des objectifs pour l'utilisation de l'eau, l'amélioration de l'efficacité de celle-ci et la qualité de l'eau. Une planification scientifique plus poussée devrait protéger les sols et les nappes souterraines afin de respecter le 14ème plan quinquennal. En outre, le Plan d'action pour la prévention et la lutte contre la pollution (également connu en anglais sous le nom de Water Ten Plan) vise à contrôler la qualité des nappes souterraines (Xinhua, 2020 ; China Water Risk, 2015).

Le cadre stratégique national pour les eaux souterraines de l'Australie a fait suite au plan d'action national pour les eaux souterraines. En Nouvelle-Galles du Sud, la planification et l'allocation des ressources s'appuient sur les plans de partage de l'eau ; le plan d'action pour la réforme de

l'eau établit la manière dont le gouvernement doit atteindre ses objectifs (Gouvernement de la Nouvelle-Galles du Sud, n.d.a., n.d.b.). L'État a recours à un régime d'accès global (*Bulk Access Regime*) pour déterminer la quantité d'eau disponible à l'extraction pour tous les utilisateurs autorisés dans le cadre d'un plan de partage de l'eau (voir également l'encadré 2.3). Par exemple, le Décret sur les ressources en eaux souterraines du Grand Bassin artésien de 2020 établit des règles selon lesquelles les allocations d'eau doivent être ajustées, reconnaissant *entre autres* l'effet de la variabilité climatique sur la disponibilité de l'eau (Gouvernement de la Nouvelle-Galles du Sud, 2020).

L'exemple du Gujarat et du Rajasthan, en Inde, est instructif par rapport à la planification participative. En effet, les chercheurs ont incité les villageois à s'approprier la situation et à modifier leur comportement face à la surexploitation des nappes souterraines. Les utilisateurs finaux ont appris à surveiller les eaux de pluie, à faire fonctionner des stations météorologiques automatiques et à saisir des données dans une application. Cela a permis de calculer le bilan hydrique de la recharge et d'évaluer quels volumes d'irrigation pouvaient être autorisés (Maheshwari et al., 2014).

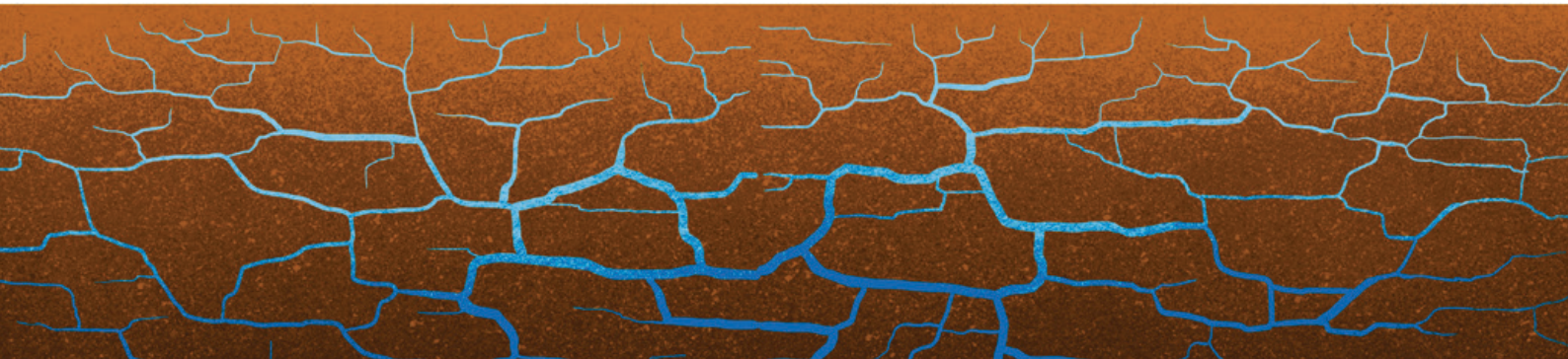
Chapitre 11

Gestion des eaux souterraines

UNESCO-PHI
Craig Simmons et Alice Aureli

IGRAC
Neno Kukurić

Avec les contributions de Anita Milman (Université du Massachusetts), Jane Dottridge (AIH), Bruce Misstear (Trinity College, Université de Dublin), Angelos Findikakis et Alberto Guadagnini (AIRH), Emilio Custodio (Université polytechnique de Catalogne), Virginia Newton Lewis (WaterAid), Christophe Cudennec (AISH), Enrique Fernández Escalante (TRAGSA), Kerstin Danert (Ask for water GmbH), Christina Copeland (CDP), Ziad Khayat (CESAO), Guy Fradin (AIRE), Ghislain de Marsily (Sorbonne Université et École nationale supérieure des Mines de Paris), Peter Dillon (CSIRO - Département Terre et eau, Université Flinders et le National Centre for Groundwater Research and Training, Australie) et Catalin Stefan (Université technique de Dresde)



11.1 Introduction

La gestion des eaux souterraines comprend les décisions opérationnelles et pratiques quotidiennes qui guident l'extraction des eaux souterraines ainsi que d'autres activités qui ont une incidence sur les eaux souterraines et les aquifères à travers lesquels elles s'écoulent. Elle peut être instaurée en vue d'atteindre les buts et objectifs des politiques énoncées par les lois et les procédures administratives (voir chapitre 10) de même qu'elle peut être entreprise par des organismes et des personnes physiques agissant de leur propre chef. La connaissance des systèmes de nappes souterraines et de leurs conditions d'existence constitue une base de gestion importante, étant donné qu'elle permet d'identifier ce qui doit être géré, quelles mesures peuvent être adoptées et quelles pourraient en être les répercussions.

La gestion des eaux souterraines est de nature pluridimensionnelle étant donné que les eaux souterraines fournissent un ensemble de services d'approvisionnement, de régulation et de soutien (Bergkamp et Cross, 2007 ; Griebler et Avramov, 2015 ; voir figure 1.5). Elle vise à contrôler l'extraction et la qualité des eaux souterraines ainsi qu'à faire face aux effets de cette extraction sur les écosystèmes, les eaux de surface, l'affaissement des sols notamment. De même, elle vise à distribuer les ressources en eau d'une manière qui soit en cohérence avec les priorités et les objectifs prévus par les politiques relatives aux eaux souterraines. La réussite de tout processus de gestion passe par un examen des facteurs externes et des différents effets qu'aura cette gestion afin d'éviter des conséquences imprévues et inattendues.

Ce chapitre donne un aperçu de la gestion des eaux souterraines. Parmi les aspects qui y seront abordés figurent la collecte des données et l'acquisition des connaissances, le contrôle des extractions, la protection de la qualité de l'eau et la gestion des nappes souterraines dans une perspective plus durable et pour un large éventail de besoins. Les pratiques de gestion intégrée des eaux souterraines, telles que la gestion de la recharge des aquifères (MAR), y sont également décrites.

11.2 Exigences en matière de données et de connaissances

Le chapitre 9 décrit les outils et méthodes nécessaires pour l'établissement d'une base de connaissances sur les eaux souterraines ainsi que pour maintenir celle-ci à jour. En ce qui concerne la gestion des eaux souterraines, un modèle conceptuel hydrogéologique — décrivant les caractéristiques structurelles, les conditions de délimitation et les propriétés hydrauliques du système de nappes souterraines — est nécessaire pour estimer la disponibilité des eaux souterraines ainsi que comprendre et caractériser les principaux processus physiques qui se déroulent dans le système. Étant donné que les aquifères sont des systèmes dynamiques sujets au changement, les volumes extraits, le niveau des nappes et la qualité des eaux doivent être régulièrement contrôlés afin d'obtenir des informations sur l'état des systèmes de nappes souterraines et leurs évolutions au fil du temps. Les modèles conceptuels hydrogéologiques, le bilan hydrique (recharge, débit et différence entre les deux) et les données de surveillance fournissent les éléments de base d'une modélisation, susceptible d'aider à mieux comprendre les débits d'écoulement à travers le système de nappes souterraines et pouvant servir à prédire l'état futur de ce système (avec ou sans des mesures de gestion).

11.3 Le contrôle des extractions

L'un des éléments les plus critiques de la gestion des eaux souterraines est sans doute le contrôle des emplacements d'extraction et la quantité d'eau prélevée ainsi dans l'aquifère. Que les puits et forages (aussi appelés puits forés ou puits tubulaires) soient situés aux bons endroits et construits de façon adéquate est essentiel à la gestion des impacts hydrogéologiques des extractions, tant sur les aquifères que sur d'autres ressources environnementales importantes, à savoir les fleuves, les lacs, les zones humides, les sources et les écosystèmes dépendant des eaux souterraines. Le choix minutieux de l'emplacement des puits est important afin de prévenir ou de réduire les interactions potentielles entre puits. La maîtrise des quantités d'eau prélevées est importante, car un pompage intensif et ininterrompu des nappes souterraines sur de longues périodes peut entraîner l'épuisement de celles-ci.

Une multitude d'outils peuvent être utilisés dans la gestion des prélèvements d'eaux souterraines (tableau 11.1). Le type d'outil utilisé dépendra des méthodes de gestion définies par les régimes de gouvernance et les cadres politiques en place. Toutefois, la gestion des eaux souterraines ne relève pas toujours du gouvernement. Les communautés et/ou les utilisateurs des ressources en eaux souterraines peuvent eux-mêmes choisir, de manière indépendante, de gérer l'emplacement des puits et les extractions d'eaux souterraines et ce faisant, utiliser des outils semblables à ceux utilisés par le gouvernement.

Tableau 11.1
Méthodes de contrôle des extractions d'eaux souterraines

Types de gestion	Outils de gestion
Réglementaire : contrôle la mise en place des puits et les prélèvements en établissant les conditions dans lesquelles les eaux souterraines peuvent être extraites	• Normes relatives à la construction, au creusage et/ou à l'espacement des puits et des forages • Attribution et application d'autorisations à l'eau (droits, concessions, licences ou permis de prélèvement) qui fixent une allocation volumétrique ainsi qu'un calendrier des prélèvements • Réduction du pompage soit en cas de sécheresse, soit en fonction des conditions climatiques ou du débit des cours d'eau • Quotas ou restrictions sur l'énergie utilisée pour l'extraction des eaux souterraines
Gestion fondée sur le marché : encourage ou dissuade l'extraction d'eaux souterraines et les activités connexes en modifiant leur coût	• Tarifs/indemnités appliqués directement aux prélèvements d'eaux souterraines ou à des biens de substitution tels que l'électricité ou l'utilisation des sols • Subventions (allocation, prêts, accès à des biens ou services à prix réduit et assistance technique) qui récompensent les économies d'eau ou facilitent l'adoption de nouvelles technologies et pratiques
Informationnelle : influence l'extraction des eaux souterraines et les activités connexes par l'éducation, la diffusion d'informations et la fourniture de conseils	• Diffusion d'informations, de conseils ou de données visant à faire évoluer les comportements • Campagnes de sensibilisation et marketing social • Élaboration de normes ou de certifications • Fourniture d'une aide technique
Informelle : influence l'extraction des eaux souterraines et les activités connexes par le biais de normes culturelles et de savoirs situés	• Pression sociale, suivi et sanctions • Comportement des utilisateurs d'eaux souterraines adaptant la fréquence et la quantité de leurs prélèvement aux modifications de l'aquifère

L'instauration de différents types d'outils de gestion peut influencer simultanément le lieu, le moment et le volume des extractions.

Souvent, la première mesure de gestion consiste à adopter de bonnes pratiques dans le choix de l'emplacement et la construction des puits. Le choix de l'emplacement doit également tenir compte des facteurs socio-économiques et culturels. Par exemple, dans le cas des puits en zones rurales en Afrique et en Asie, où la responsabilité de la collecte de l'eau incombe généralement aux femmes, le choix de l'emplacement du puits doit prendre en compte, outre les répercussions sur l'aquifère, sa proximité et sa sécurité pour les personnes l'utilisant (Misstear et al., 2017). La construction adéquate, l'entretien et la vérification des puits doivent être effectués selon les règles de l'art afin d'assurer un accès durable aux eaux souterraines ainsi que la rentabilité et la sécurité. La diminution de fonctionnalité des pompes à main et la défaillance des forages en raison d'un matériel de mauvaise qualité sont autant de problèmes qui affectent de nombreux puits, en particulier dans certaines régions d'Afrique (Andres et al., 2018 ; Tincani et al., 2015).

Dans les régions où les eaux souterraines ont été historiquement très peu réglementées, voire pas du tout, leurs utilisateurs peuvent considérer les mesures de gestion comme une forme d'expropriation par rapport à ce qu'ils considèrent leur appartenant

L'instauration d'outils de gestion des nappes souterraines implique d'avoir d'abord mis en place des structures juridiques et institutionnelles qui encadrent leur utilisation et leur application. La mise en œuvre de tout nouveau régime de contrôle du pompage et de l'utilisation des eaux souterraines ne va pas sans difficulté. Dans de nombreuses régions du monde, les lois et institutions régissant les questions relatives aux eaux souterraines en sont encore à un stade embryonnaire sans être pleinement opérationnelles. En ce qui concerne les approches réglementaires, il n'y a pas de méthode unique servant à déterminer les allocations volumétriques ; toute méthode appliquée aura des avantages et des inconvénients. Selon les régions, les gouvernements ont défini des droits sur l'eau en fonction des taux de pompage habituels, des utilisations actuelles, de la zone de terrain concernée ou d'autres méthodes. Les gouvernements cherchent souvent à limiter les extractions à partir d'un rendement estimé « sûr » ou « durable », bien que ces concepts soient définis de manière ambiguë. Les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface rendent plus difficiles la définition et la détermination de débits d'écoulement vers les rivières qui soient acceptables du point de vue environnemental lors de l'établissement de permis d'extraction d'eau souterraine.

De plus, les utilisateurs des eaux souterraines peuvent s'opposer à l'instauration de nouvelles mesures de contrôle du pompage des nappes souterraines. Dans les régions où les eaux souterraines ont été historiquement très peu réglementées, voire pas du tout, leurs utilisateurs peuvent considérer les mesures de gestion comme une forme d'expropriation par rapport à ce qu'ils considèrent leur appartenant. Autoriser, de façon dérogatoire, certaines utilisations (domestique, élevage) ou un certain volume de pompage inframarginal (soit un volume autorisé et généralement faible, qui peut être pompé sans être soumis à des réglementations ou à des tarifs, généralement dans le but de satisfaire les besoins humains fondamentaux ou pour l'agriculture à l'échelle d'un foyer) peut aider à surmonter la résistance au contrôle par la réglementation et la tarification. Cependant, il faut veiller à ce que les utilisations dérogatoires ne nuisent pas aux objectifs de gestion des eaux souterraines (Jakeman et al., 2016 ; Molle et Closas, 2020). L'équité est une considération importante car les mesures de gestion qui affectent différemment ceux qui pompent et utilisent les eaux souterraines peuvent entraîner des conflits. La mise en œuvre est généralement plus efficace lorsque le système de « la carotte et du bâton » est utilisé afin de modifier le comportement des utilisateurs (Molle et Closas, 2020).

Pour que toute méthode de contrôle des extractions d'eaux souterraines soit efficace, il est important de surveiller les taux d'extraction et les conditions de l'aquifère ainsi que d'assurer le respect des permis et des exigences réglementaires. La surveillance permet également d'aider les législateurs à justifier les contraintes sur les extractions (Moench, 2004). Les nappes souterraines n'étant pas apparentes, la quantité d'eau extraite reste malheureusement souvent indéterminée. Les utilisateurs eux-mêmes peuvent ignorer la quantité qu'ils prélèvent ou, lorsqu'ils le savent, ils peuvent avoir des raisons de ne pas révéler cette information. Les compteurs fournissent des informations précieuses. Toutefois, leur installation et leur relevé ne vont pas sans frais et peuvent être considérés par les propriétaires de puits comme une atteinte à leur vie privée. De fait, la plupart des puits dans le monde ne sont pas équipés de compteurs (Kemper, 2007). Des technologies nouvelles et moins coûteuses de mesure des extractions sont en cours de développement. En outre, on peut estimer indirectement les volumes pompés par la télédétection, la détermination de la superficie des terres irriguées et la consommation d'électricité, entre autres (Giordano, 2009 ; Ursitti et al., 2018). Néanmoins, dans de nombreux endroits, la résistance sociale et politique à la surveillance et à la divulgation des données peut entraver le suivi et l'application des réglementations en matière d'extraction d'eaux souterraines.

L'encadré 11.1 présente une étude de cas sur la réglementation et l'accroissement des puits afin de réduire les impacts de l'extraction des eaux souterraines.

Encadré 11.1 Gestion des extractions d'eaux souterraines : la délivrance de permis et l' « accroissement des puits » pour réduire les impacts (bassin de la rivière South Platte, Colorado, États-Unis)

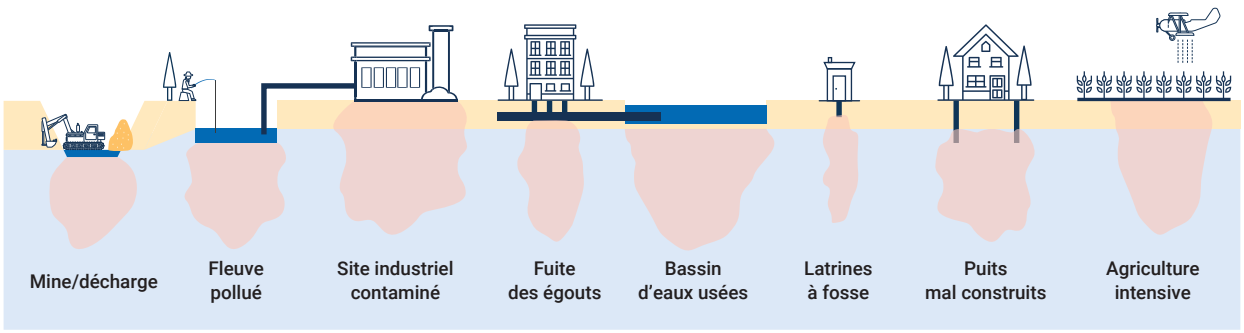
Le niveau des nappes souterraines et le débit des eaux de surface dans le bassin de la rivière South Platte, dans le Colorado (États-Unis), ont considérablement diminué au milieu et à la fin du XXe siècle en raison de l'intensification du pompage des nappes souterraines. Ce qui a créé des tensions entre les utilisateurs des eaux de surface et les utilisateurs des eaux souterraines, mettant en danger les habitats de plusieurs espèces menacées d'extinction se trouvant en aval du fleuve. Pour remédier à ce problème, l'État du Colorado exige que toute entité qui a commencé à pomper de l'eau après 1997, y compris tout nouvel utilisateur, obtienne une autorisation de pompage auprès du Tribunal des eaux de l'État. Pour ce faire, les postulants doivent démontrer que leurs extractions d'eaux souterraines n'auront pas de répercussions négatives sur les autres utilisations et utilisateurs ou, si c'est le cas, il leur est demandé de procéder à ce que l'État appelle « un accroissement des puits ». Cet accroissement implique de compenser ou d'éliminer tout impact potentiel des extractions d'eaux souterraines sur le débit du fleuve, généralement par le biais d'une recharge ou d'une substitution. Les plans d'accroissement des puits doivent comprendre une évaluation de l'épuisement potentiel du débit et un plan pour l'éviter, en tenant compte du temps de latence entre le pompage, l'accroissement des puits et le débit du fleuve. De cette manière, l'État gère les extractions d'eaux souterraines afin de garantir qu'elles ne violent pas les droits existants sur les eaux de surface et les eaux souterraines, tout en protégeant les débits réservés.

Voir Milman et al. (2021) et Blomquist et al. (2010) pour plus d'informations.

11.4 Protection de la qualité des nappes souterraines

Comme cela a été décrit dans les chapitres précédents, bien des menaces pèsent sur la qualité des nappes souterraines en raison de l'intensification de l'agriculture, de l'urbanisation, des activités industrielles, de l'exploitation minière, de la croissance démographique et du changement climatique ainsi que des contaminants d'origine naturelle tels que l'arsenic et le fluorure (voir figure 11.1). Afin d'éviter que ces menaces et préoccupations n'atteignent des niveaux problématiques, les nappes souterraines doivent être gérées efficacement dans le but d'empêcher l'augmentation de la pollution et d'en inverser la tendance, et de réduire les effets de la détérioration de la qualité de l'eau sur la santé humaine et l'environnement.

Figure 11.1 Sources de pollution qui menacent la qualité des nappes souterraines



Source : basé sur Villholth et al. (2011, fig. 2.6, p. 15).

La façon la plus durable et la plus rentable de gérer la qualité des nappes souterraines consiste à en assurer une protection adéquate afin d'éviter leur contamination par des activités humaines. Bien que la réhabilitation des nappes souterraines puisse être un moyen efficace de réduire les concentrations de contaminants, elle est onéreuse. La protection des nappes souterraines peut être assurée grâce à : i) une approche axée sur

les sources de pollution, qui prévient et réduit l'impact du développement sur la qualité des eaux souterraines et ii) une approche axée sur les ressources en eaux souterraines qui met en œuvre des mesures pour protéger l'aquifère, s'assurant qu'il soit viable et propice à un usage bénéfique. En ce qui concerne les contaminants d'origine naturelle, des mesures telles que la restriction des prélèvements, la limitation du rabattement pour éviter l'infiltration d'eau de qualité différente et l'imposition d'exigences opérationnelles (des contraintes sur le moment et le taux de pompage afin de réduire le risque de détérioration de la qualité de l'eau par exemple) peuvent être définies et mises en œuvre.

Les sources de pollution peuvent être contrôlées par des normes, des protocoles de surveillance, des pratiques de gestion sur site et des permis, qui précisent les exigences en matière de déversement de déchets et d'activités potentiellement contaminantes. Ces moyens de gestion déterminent généralement quels produits chimiques ou constituants peuvent être utilisés ainsi que le moment, le lieu et les modalités de cette utilisation. Ils précisent également quelles technologies et procédures doivent être suivies pour éviter ou réduire la contamination de même que le risque d'accident ou de déversement. La surveillance, l'application des mesures et la sanction des défauts de conformité par des amendes amélioreront l'efficacité des activités de protection des nappes souterraines.

Les sources de pollution peuvent être contrôlées par des normes, des protocoles de surveillance, des pratiques de gestion sur site et des permis, qui précisent les exigences en matière de déversement de déchets et d'activités potentiellement contaminantes

La protection de l'aquifère peut passer par une cartographie de la vulnérabilité, l'établissement de zones de protection pour préserver l'eau potable (voir encadré 11.2) et la planification de l'utilisation des terres dans un souci de protéger la qualité des eaux souterraines. Les meilleures pratiques de gestion, les programmes d'incitation à la protection des aquifères et de dissuasion des mauvaises pratiques, ainsi que les campagnes d'éducation et de sensibilisation peuvent également contribuer à la protection des aquifères.

Un puits mal construit constitue souvent la principale voie de pénétration des polluants dans l'aquifère (ou de leur déplacement entre les aquifères). Pour aider à préserver la qualité de l'eau, les puits doivent être construits avec des joints d'étanchéité sanitaires appropriés et des ouvrages de tête protecteurs.

La gestion de la qualité nécessite une surveillance au moyen de la collecte et de l'analyse régulière d'échantillons d'eau sur des périodes prolongées. Des capacités institutionnelles, techniques et scientifiques sont nécessaires pour recueillir des données de haute qualité à une fréquence suffisante et pour évaluer les évolutions de la qualité de l'eau afin d'identifier les risques et déterminer l'effet des activités de gestion.

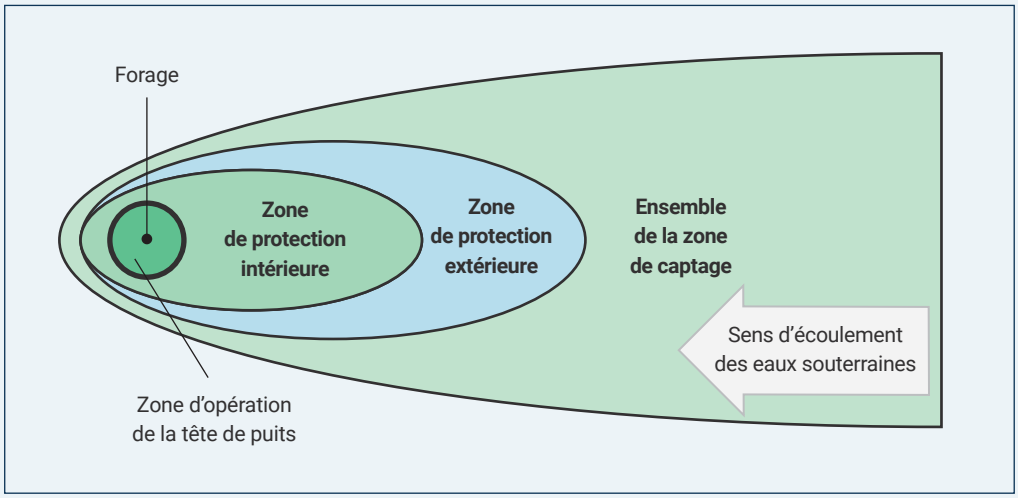
La pollution diffuse et la dispersion des sources potentielles de contaminants constituent des défis véritables pour le contrôle de la qualité des eaux souterraines. En effet, il existe de nombreuses voies par lesquelles les contaminants peuvent atteindre l'aquifère et il est impossible de surveiller et de contrôler toutes ces voies. La contamination d'un système aquifère n'est souvent détectée que très longtemps après son apparition. En effet, en de nombreux endroits dans le monde, les sources de pollution n'existent plus, mais les panaches de contamination sont toujours présents ou commencent à apparaître (les nitrates, les liquides denses en phase non aqueuse par exemple).

La prévention de la pollution et la protection d'un aquifère nécessitent souvent une coordination entre une variété d'organismes et d'acteurs. Dans de nombreux pays, des organismes distincts supervisent l'emploi des terres, les ressources en eau, le déversement de déchets et l'utilisation de substances dangereuses. La coordination, la communication et l'harmonisation réglementaire entre les organismes, les acteurs et les cadres stratégiques concernés font partie des nombreux défis à relever pour protéger la qualité des eaux souterraines de manière efficace et efficiente.

Encadré 11.2 Zones de protection des sources d'eaux souterraines

Les zones de protection des sources d'eaux souterraines sont utilisées pour prévenir la pollution des sources d'eau potable et des nappes souterraines utilisées à des fins agricoles. Cette méthode établit généralement une distance minimale entre les zones d'élimination des déchets ou d'autres zones de pollution, et les zones d'approvisionnement protégées en eaux souterraines. La conception des zones de protection est déterminée en fonction des risques, de la vulnérabilité et des caractéristiques hydrogéologiques et hydrogéochimiques. Il existe de nombreux exemples de cette méthode de gestion dans le monde, notamment en Australie, au Canada, en Europe, en Inde et aux États-Unis.

Représentation schématique des zones de protection autour d'une source d'eau



Source : basé sur Nel et al. (2009) et Rajkumar et Xu (2011). .

11.5 Méthodes de gestion intégrée

Les systèmes de nappes souterraines n'existent pas de manière indépendante : ils sont étroitement connectés aux eaux de surface, aux terres, au climat et aux écosystèmes. Ces liaisons, ainsi que leurs rapports avec la société, la culture et l'économie, doivent être bien comprises afin d'assurer la gestion efficace des eaux souterraines. Dans de nombreux pays, les eaux souterraines et les eaux de surface sont gérées de manière indépendante. De surcroît, les politiques et les activités extérieures au secteur de l'eau (en particulier celles liées à la terre, à l'alimentation et à l'agriculture, à l'exploitation minière et au secteur de l'énergie) ont une incidence sur la demande en eaux de surface et en eaux souterraines, ont un impact sur l'infiltration et la recharge, et peuvent créer des sources de contamination.

La gestion conjointe des ressources en eaux de surface et en eaux souterraines comme le potentiel des solutions fondées sur la nature devraient faire l'objet d'une attention toute particulière (Van der Gun, 2020). Comprendre les relations entre les eaux de surface et les eaux souterraines, en quantifiant les flux d'échange, les directions et les interactions influant sur la qualité de l'eau, est indispensable pour s'assurer que la gestion permet d'obtenir les résultats escomptés. La gestion des terres et des écosystèmes, coordonnée avec la gestion des nappes souterraines, peut améliorer le stockage et la rétention d'eau, protéger la qualité de l'eau ou, au contraire, nuire aux systèmes de nappes souterraines. Par conséquent, il est essentiel d'assurer la cohérence des politiques et de prendre en compte l'ensemble des utilisateurs, des utilisations et des impacts.

En raison de la nature évolutive de la gestion des eaux souterraines, de multiples institutions, politiques et outils de gestion existent, ce qui peut entraîner des insuffisances et des divergences. La planification de la gestion des eaux souterraines (voir chapitre 10) fournit un mécanisme de coordination entre les nombreux acteurs impliqués dans la gestion des eaux souterraines, de même qu'elle permet l'intégration et la synergie entre les multiples politiques et outils utilisés (Foster et al., 2015 ; Gage et Milman, 2020).

L'intégration à la gestion de l'environnement, à la gestion de l'occupation des terres et à la gestion de l'espace et des ressources du sous-sol sont autant de questions importantes qui relèvent de la gestion intégrée

L'intégration à la gestion de l'environnement, à la gestion de l'occupation des terres et à la gestion de l'espace et des ressources du sous-sol sont autant de questions importantes qui relèvent de la gestion intégrée. La MAR est un exemple d'approche intégrée (voir encadré 7.1).

Également appelée recharge artificielle, la MAR implique l'utilisation d'infrastructures techniques ou naturelles afin d'augmenter l'infiltration dans un système aquifère (Dillon et al., 2019). Les technologies telles que la MAR sont importantes pour protéger les ressources en eau contre la sécheresse et l'intrusion d'eau salée, ainsi que pour augmenter l'approvisionnement en eau, améliorer la qualité de l'eau, maintenir la structure et la qualité de l'aquifère, et soutenir les écosystèmes dépendant des eaux souterraines. La MAR permet la reconstitution des aquifères en complément des barrages de stockage et offre une alternative rentable, réduisant l'évaporation et les impacts environnementaux. La MAR peut également être utilisée pour retenir les eaux de ruissellement en zones urbaines (encadré 11.3) et les eaux recyclées non collectées afin qu'elles puissent être employées de façon productive en cas de besoin. À l'échelle du bassin versant, la MAR peut contribuer à maintenir les flux d'eau environnementaux et leur disponibilité, en créant des variations de rejets d'eau dans un cours d'eau (Page et al., 2018).

La recharge artificielle possède deux éléments principaux : i) l'interception de l'eau (généralement l'eau de surface) et ii) les dispositifs permettant l'infiltration de cette eau interceptée afin qu'elle pénètre dans l'aquifère. Toute forme de recharge artificielle combine les deux dispositifs. Les aspects techniques concernent parfois la première composante (barrages de recharge, prises d'eau dans une rivière) et, dans d'autres cas, la seconde (procédés d'épandage à partir d'étangs ou de bassins, puits d'injection) ; et parfois un mélange des deux (épandage par canaux, infiltration induite sur les berges). Une conception appropriée du système de MAR ainsi qu'une exploitation et un entretien adéquats peuvent améliorer les performances qualitatives et quantitatives du système.

De nombreux exemples d'application réussie de la MAR existent. Le portail MAR[40], accessible à travers le Système mondial d'information sur les eaux souterraines du Centre international d'évaluation des ressources en eaux souterraines, contient des informations détaillées sur quelque 1 200 sites de MAR se trouvant dans une cinquantaine de pays ainsi que des cartes de conformité régionales de la MAR. Dillon et al. (2019) présentent un aperçu de la diffusion des techniques de MAR dans le monde au cours des soixante dernières années.

11.6 Conclusions

La gestion des eaux souterraines présente de nombreux défis et opportunités. Ainsi, pour qu'elle soit efficace, il convient de prendre en compte les relations entre les nappes souterraines, la société (y compris la croissance démographique), l'environnement et les écosystèmes, et le changement climatique. Les politiques et les activités extérieures au secteur de l'eau influencent la demande en eaux souterraines, de même que l'infiltration et la recharge, et par conséquent, peuvent également créer des sources de contamination. La gestion des nappes souterraines a également des répercussions sur la société, l'environnement et l'économie.

[40] Pour plus d'informations, consulter ggis.un-igrac.org/view/marportal.

Encadré 11.3 Collecte des eaux pluviales pour le stockage et la récupération dans les aquifères : exemple d'un projet de MAR dans la région d'Adélaïde (Australie)

À Adélaïde (Australie), les ruissellements d'eau de pluie sont collectés dans de petites zones humides aménagées, qui ont pour fonction de permettre la rétention et le traitement des eaux, de favoriser la biodiversité et de fournir une destination de loisirs. Au cours de plusieurs journées de rétention dans les zones humides, les polluants et les agents pathogènes sont éliminés. Ensuite, l'eau est injectée dans l'aquifère tertiaire profond au moyen du dispositif de stockage et de récupération de l'eau par les aquifères (ASR). Les eaux pluviales récupérées de cette manière représentent environ 10 % de l'approvisionnement en eau d'Adélaïde. En 2017, 58 dispositifs de MAR étaient en service, avec une capacité de recharge combinée de plus de 20 millions de m³ par an.

Les systèmes de MAR sont peu coûteux et bien accueillis par la majorité du grand public.

Par le passé, les eaux souterraines n'attiraient généralement l'attention des gestionnaires qu'après qu'un problème se fut aggravé au point de devenir perceptible. C'est seulement à partir de ce moment que la gestion devenait réactive. Des approches proactives de la gestion des eaux souterraines sont nécessaires pour prévenir la détérioration et l'épuisement de la ressource.

La gestion des eaux souterraines doit prendre en compte simultanément les multiples dimensions des systèmes d'eaux souterraines : le stockage, le débit, la qualité et le fonctionnement des nappes ainsi que la structure et les propriétés de l'aquifère lui-même.

La gestion des eaux souterraines doit s'opérer à tous les niveaux. Si les gouvernements et leurs organismes mandatés peuvent se charger de la coordination générale de la gestion des eaux souterraines, les communautés, les services de distribution d'eau, les industries, les agriculteurs et d'autres individus peuvent également jouer un rôle important.

Le manque de données et de connaissances dans ce domaine reste un obstacle majeur à une gestion des eaux souterraines avertie. La surveillance, les évaluations et les enquêtes sont donc essentielles pour ce faire (voir chapitre 9).

Les capacités et les moyens (à la fois humains et intellectuels) sont nécessaires pour une gestion efficace et réussie des eaux souterraines. Il est, de ce fait, primordial d'éduquer les jeunes et de s'assurer que leurs voix soient entendues pour le succès futur de la gestion des eaux souterraines dans le monde. Des programmes de recherche et d'éducation bien financés sont nécessaires pour former les gestionnaires tandis que la gouvernance et les politiques doivent créer un environnement propice à la gestion. Le développement et le maintien de la gestion des eaux souterraines nécessitent un soutien financier et politique important de la part des gouvernements, ainsi que des mandats adéquats pour les organismes qui s'en chargeront.

Chapitre 12

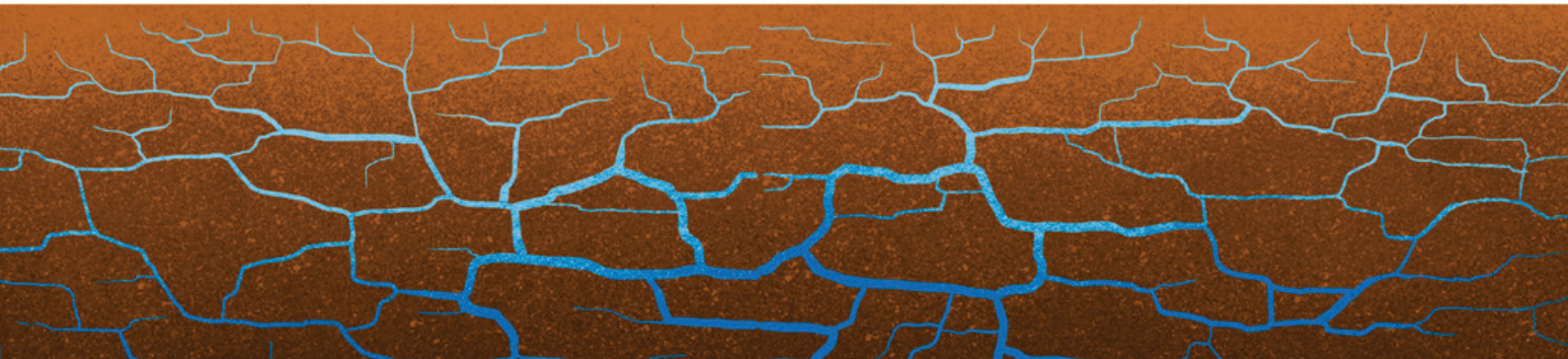
Aquifères transfrontaliers

UNESCO-PHI
Raya Marina Stephan, Alice Aureli et Aurélien Dumont

CEE-ONU
Annukka Lipponen* et Sarah Tiefenauer-Linardon

Avec les contributions de Christina Fraser (IGRAC), Alfonso Rivera et Shammy Puri (AIH), Stefano Burchi (AIDA), Gabriel Eckstein (École de droit de l'Université A&M du Texas), Christian Brethaut (Université de Genève), Ziad Khayat (CESAO), Karen Villholth (IWMI), Lesha Witmer (WfWP), Renee Martin-Nagle (Environmental Law Institute), Anita Milman (Université du Massachusetts), Francesco Sindico (Université de Strathclyde) et James Dalton (UICN)

* travaillant pour le Ministère de l'agriculture et des forêts de Finlande au moment de la publication



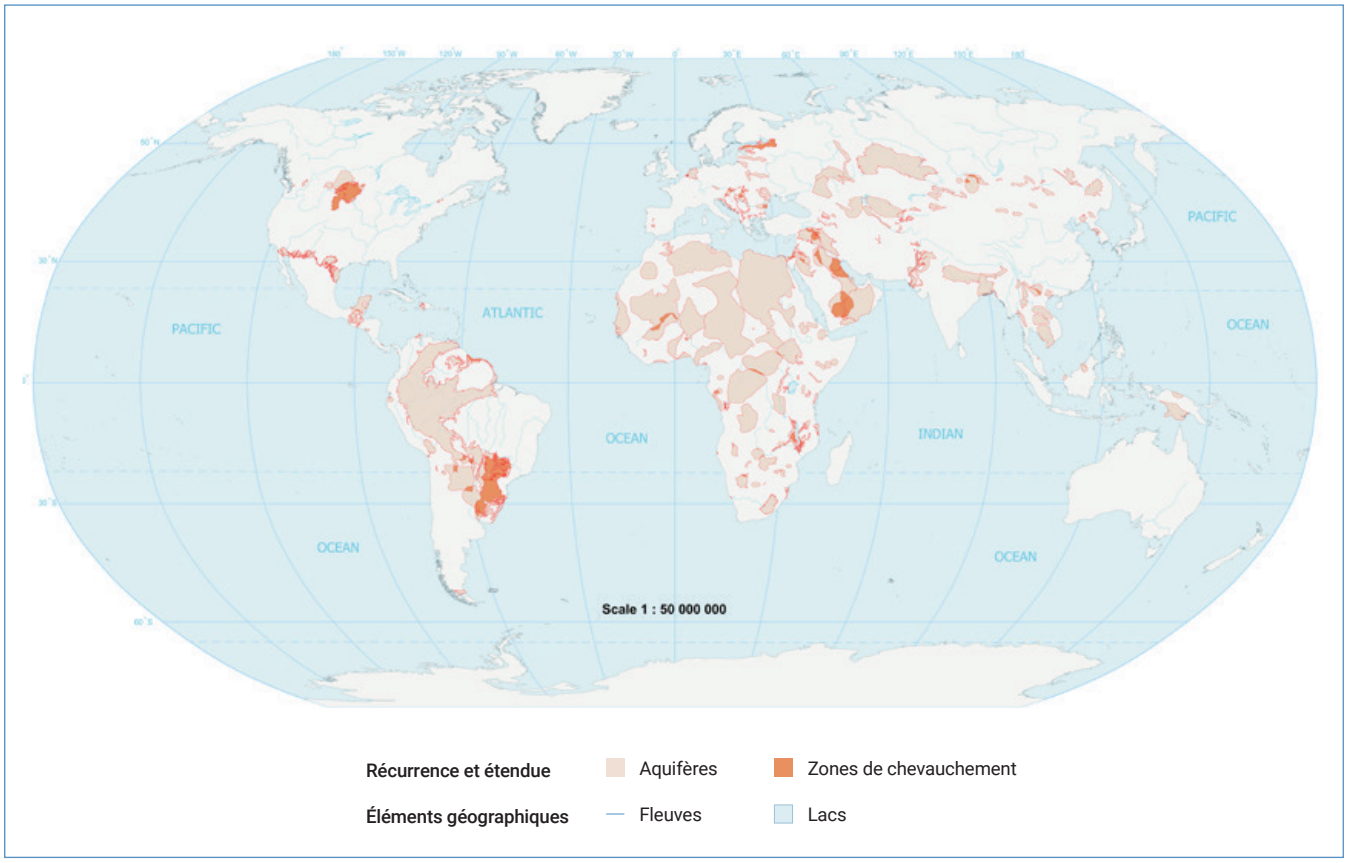
12.1 Introduction

Ce chapitre donne un aperçu de l'état des aquifères transfrontaliers et de la coopération relative aux ressources en eaux souterraines partagées, soulignant la complexité de l'évaluation, de l'analyse et de la gestion de ces systèmes. Il résume les principaux défis concernant les aquifères transfrontaliers et la nécessité d'une gestion plus globale et intégrée, qui inclurait les aspects techniques, juridiques et organisationnels ainsi que la formation et la coopération.

12.2 État actuel des connaissances sur les aquifères transfrontaliers

Lorsqu'un aquifère ou un système aquifère est dit « transfrontalier », cela signifie qu'il se déploie sous différents États (Assemblée générale des Nations Unies, 2009). Les aquifères transfrontaliers comprennent une voie souterraine naturelle d'écoulement du flux de la nappe, voie qui traverse une frontière internationale de telle sorte que l'eau s'écoule d'un côté à l'autre de cette frontière (UNESCO, 2001). Le premier inventaire mondial des aquifères transfrontaliers a été entrepris par l'UNESCO-PHI, qui a lancé l'Initiative sur la gestion des ressources des aquifères transnationaux (ISARM) en 2000 (encadré 12.1). La répartition mondiale des aquifères transfrontaliers, telle qu'elle est aujourd'hui connue, est présentée sur la figure 12.1, qui se base sur un recensement des projets et des initiatives aux niveaux mondial et régional[41]. La première évaluation mondiale de référence de trois cents des plus grands aquifères transfrontaliers au monde a été entreprise par le Programme d'évaluation des eaux transfrontalières (UNESCO-PHI/PNUE, 2016). Ce programme s'intéressait aux aquifères transfrontaliers en termes de dépendance humaine vis-à-vis de la ressource : il élaborait des scénarios basés sur les pressions démographiques, en identifiant de futures zones sensibles en Afrique subsaharienne, dans une partie de l'Asie orientale et en Amérique centrale. La délimitation exacte d'un grand nombre d'aquifères transfrontaliers n'a pas encore été achevée, en particulier au niveau local où les aquifères transfrontaliers, même s'ils sont petits, peuvent être vitaux à la survie des communautés (Eckstein, 2013 ; Fraser et al., 2020).

Figure 12.1 Aquifères transfrontaliers dans le monde



Source : IGRAC (2021). © IGRAC, décembre 2021. Attribution Non-Commercial Share Alike (CC BY-NC-SA 4.0).

[41] Y compris la première et deuxième évaluations des aquifères transfrontières situés en Europe du sud-est, dans le Caucase et en Asie centrale par la CEE-ONU (CEE-ONU, 2007, 2011) ; Inventaire des ressources en eau partagées en Asie occidentale (CESAO/BGR, 2013).

Encadré 12.1 Initiative sur la gestion des ressources des aquifères transnationaux

En 2000, le Programme hydrologique intergouvernemental de l'UNESCO a lancé l'Initiative sur la gestion des ressources des aquifères transnationaux (ISARM) (Résolution XIV-12 - UNESCO-PHI, 2000), destinée à réaliser un inventaire mondial des aquifères transfrontaliers de même qu'à accroître et soutenir la coopération entre les pays grâce à l'amélioration des connaissances sur les aquifères transfrontaliers. Cette initiative a mené des études régionales destinées à délimiter les aquifères ainsi qu'à examiner et à analyser les aspects hydrogéologiques, juridiques, socio-économiques, institutionnels et environnementaux. Les inventaires régionaux ont révélé que certains des aquifères les plus importants en Afrique et en Amérique latine sont transfrontaliers (UNESCO-PHI, 2009).

L'initiative a contribué au renforcement des bases de connaissances et a fourni des orientations pour la coopération transnationale sur les aquifères transfrontaliers. Des progrès considérables ont également été réalisés par rapport aux aspects juridiques. L'UNESCO-PHI a aidé la Commission du droit international (CDI) à préparer un ensemble de 19 projets d'articles sur le droit des aquifères transfrontières, qui sont annexés et mentionnés dans plusieurs résolutions de l'Assemblée générale des Nations Unies.

Grâce aux activités de l'ISARM, des projets ont été lancés dans différentes régions afin d'aider les pays à mettre en place des mécanismes de coopération pour la gestion des aquifères transfrontaliers.

12.3 Les défis propres aux aquifères transfrontaliers

En général, les facteurs de stress hydrique sont les mêmes qu'il s'agisse des aquifères transfrontaliers ou nationaux. Cependant, les frontières politiques ajoutent certaines difficultés particulières. Ainsi les activités qui affectent l'aquifère dans un pays peuvent avoir un impact considérable de l'autre côté de la frontière. La figure 12.2 fournit un exemple simple des effets que l'extraction d'eaux souterraines dans un aquifère transfrontalier peut avoir au-delà des frontières. Une extraction intensive d'un côté de la frontière peut provoquer l'abaissement du niveau de la nappe dans un pays voisin. Cela peut même parfois provoquer une inversion de l'écoulement souterrain à travers la frontière. L'extraction des eaux souterraines peut également avoir un impact sur les systèmes reliés hydrauliquement à l'aquifère transfrontalier, notamment en réduisant le débit des rivières ou en perturbant les écosystèmes dépendant des eaux souterraines. De plus, la contamination de l'aquifère d'un côté d'une frontière politique peut passer de l'autre côté, ce qui peut avoir des conséquences graves pour les États voisins et compliquer les efforts de réhabilitation.

L'étendue des aquifères transfrontaliers peut varier considérablement, de quelques kilomètres carrés à plus d'un million, et de quelques dizaines à plusieurs milliers de mètres de profondeur. On peut alors se demander si la gestion et la surveillance conjointes doivent nécessairement porter sur l'étendue totale d'un aquifère transfrontalier ou, plutôt, se concentrer sur des zones sensibles particulières où les impacts d'origine transfrontière sont les plus susceptibles de se produire. L'accord sur l'aquifère Saq-Disi (partagé entre la Jordanie et l'Arabie saoudite) donne une solution possible à ce dilemme, en envisageant la création de zones de protection autour de la frontière.

La gestion coopérative des aquifères transfrontaliers peut être complexe en raison d'obstacles au sein des pays concernés, parmi lesquels (AfD, 2011) :

- Manque de perception du caractère transfrontalier parmi les autorités, les gestionnaires et les populations concernées ;
- Absence d'un cadre juridique et institutionnel spécifique ;
- Différences des méthodes et des priorités en matière de gestion et de gouvernance ;
- Manque de volonté politique en matière de coopération et de mise en œuvre d'une gestion à long terme ;

L'intégration des questions de genre dans la coopération transfrontière est une occasion de créer des opportunités de gestion socialement plus équitable des ressources en eaux souterraines transfrontalières

- Tensions entre les pays, distribution inégale des ressources, diminution de la quantité et de la qualité des eaux souterraines et différences dans les capacités de gestion au sein de contextes sociaux, économiques et environnementaux propres à chacun des pays partageant l'aquifère ;
- Connaissance fragmentée des aquifères ;
- Défaut de partage de données précises (voir tableau 12.1) ;
- Insuffisance des financements ;
- Manque de connaissances et de capacités pour concevoir et mener des études scientifiques et techniques ainsi que pour créer des institutions formelles ;
- Différence des langues parlées ou des orientations culturelles et politiques de part et d'autre de la frontière.

En outre, l'intégration des questions de genre dans la coopération transfrontière est une occasion de créer des opportunités de gestion socialement plus équitable des ressources en eaux souterraines transfrontalières.

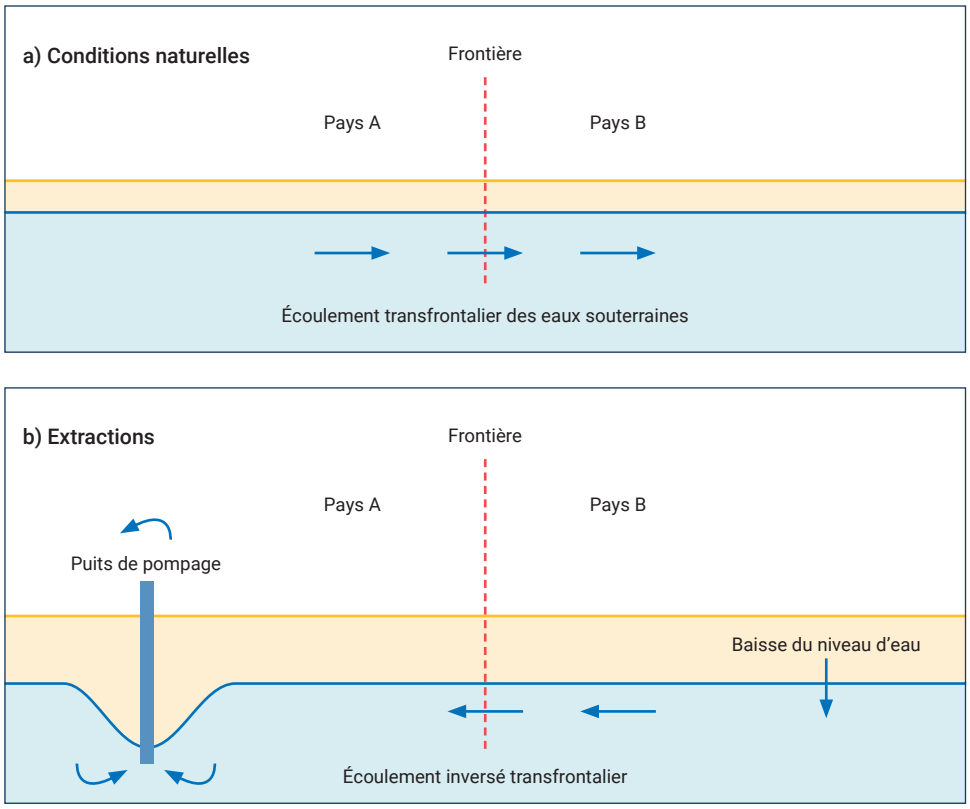
Les programmes de formation et de renforcement des capacités sont essentiels pour donner au personnel technique et administratif les moyens de comprendre les différents défis liés à l'évaluation et à la gestion des aquifères transfrontaliers (Nijsten et al., 2016).

Le partage des données représente la première étape de la coopération entre pays voisins étant donné qu'il est indispensable pour parvenir à un accord sur un modèle conceptuel fiable de l'aquifère, une condition préalable à la formulation de plans de gestion.

Lorsque les données sont inexistantes, ou que les États ne sont pas disposés à les partager, ceci peut entraver la gestion durable des systèmes transfrontaliers de nappes souterraines. La gestion des aquifères transfrontaliers se heurte souvent à un manque de

Figure 12.2

Le pompage de l'eau souterraine à partir d'un puits dans le pays A peut avoir un impact sur la partie de l'aquifère qui se trouve dans le pays B



Source : adapté de Fraser et al. (2018, fig. 6, p. 45).

volonté institutionnelle et à l'insuffisance des financements qui permettraient de collecter les informations nécessaires (AfD, 2011). Certes, les données mondiales peuvent révéler des évolutions générales, mais une compréhension plus précise aux niveaux régional et local est nécessaire pour la prise de décision conjointe et la gestion des aquifères transfrontaliers (IGRAC/UNESCO-PHI, 2015 ; Fraser et al., 2018 ; Rivera, 2015, 2020).

La gestion et le partage des données concernant les aquifères transfrontaliers peuvent être facilités par des systèmes de gestion de l'information et des plateformes web, qui aident à la collecte, au stockage, au traitement, à la visualisation et au partage des données (IGRAC/UNESCO-PHI, 2015), comme c'est le cas avec le Système mondial d'information sur les eaux souterraines (IGRAC, n.d.). Les progrès technologiques, allant des observations spatiales à la télémétrie, combinés à la science participative peuvent réduire certains des coûts et contraintes importants qui pèsent sur la collecte de données (voir chapitre 9).

Les exigences en matière de données et d'informations, telles qu'indiquées dans le tableau 12.1, s'appliquent tant aux aquifères nationaux qu'aux aquifères transfrontaliers, à l'exception des composantes juridiques et institutionnelles. Il peut toutefois s'avérer nécessaire d'harmoniser les données collectées et analysées au niveau national à partir de différentes méthodes et approches avant de pouvoir les utiliser au-delà des frontières.

L'une des composantes essentielles de la gestion des aquifères transfrontaliers est la surveillance, qui doit inclure l'observation chronologique des niveaux des nappes souterraines et de la qualité des eaux (IGRAC/UNESCO-PHI, 2015). Pour que la surveillance soit efficace, les données doivent être coordonnées, harmonisées et mises en commun entre les États partageant l'aquifère (SADC-GMI/IGRAC/IGS, 2019b). Compte tenu de la complexité de

Tableau 12.1

Données et informations requises pour évaluer et gérer un aquifère transfrontalier

Hydrogéologie, physiographie et climat	
Géométrie de l'aquifère (limites, type, profondeur de la surface phréatique, volume de l'aquifère)	Climat (température, précipitations, évapotranspiration)
Identification de la recharge et du débit de l'aquifère	Utilisation des terres
Lithologie et type de sol	Topographie
Porosité, perméabilité	Réseau des eaux de surface (fleuves, lacs)
Transmissivité et conductivité verticale	Volume des eaux souterraines
Niveaux des eaux souterraines et direction de l'écoulement	Systèmes d'écoulement des eaux souterraines
Environnement	
Qualité des eaux souterraines	Écosystèmes dépendant des eaux souterraines
Sources de pollution	Contrôle des déchets solides et des eaux usées
Conditions socio-économiques	
Population	Taux de prélèvement/densité des puits
Camps de réfugiés/de personnes déplacées à l'intérieur de leur propre pays	Dépendance humaine vis-à-vis des eaux souterraines
Utilisation des eaux souterraines	Utilisation des eaux de surface
Conditions juridiques et institutionnelles	
Cadre juridique transfrontière	Cadre juridique national
Cadre institutionnel transfrontière	Cadre institutionnel national
Propriété des eaux souterraines	Planification et protection des ressources en eau
Contrôle des extractions d'eau souterraine	Contrôle de la pollution des eaux souterraines
Application de la législation	Institutions dans le domaine de l'eau

Sources : basé sur Rivera (2015, 2020) et IGRAC/UNESCO-PHI (2015).

l'évaluation et de la surveillance des aquifères transfrontaliers, des directives ont été élaborées pour aider les États partageant un aquifère et les parties prenantes au cours de ce processus (voir l'Équipe spéciale de la surveillance et de l'évaluation de la CEE-ONU, 2000 ; AfD, 2011 ; IGRAC/UNESCO-PHI, 2015).

12.4 Aspects juridiques et institutionnels internationaux

Le droit international de l'eau a été initialement élaboré en considération des eaux de surface. Les réflexions sur la question des eaux souterraines ont commencé progressivement avec la prise de conscience de l'importance des aquifères transfrontaliers. La Convention sur la protection et l'utilisation des cours d'eau transfrontières et des lacs internationaux[42] (Convention sur l'eau –- CEE-ONU, 1992) couvre toutes les masses d'eau de surface ou d'eau souterraine qui marquent, traversent ou sont situées sur les frontières entre deux ou plusieurs États. Elle a servi de base à divers accords bilatéraux et multilatéraux (CEE-ONU, 2013). La Convention sur le droit relatif aux utilisations des cours d'eau internationaux à des fins autres que la navigation (ONU, 1997)[43] prend en compte les nappes souterraines transfrontalières seulement lorsque celles-ci sont reliées à un système d'eaux de surface international et s'écoulent vers le même exutoire. Elle ne tient pas compte des caractéristiques spécifiques des divers types d'aquifères.

Pour combler cette lacune, la Commission du droit international (CDI) a élaboré un instrument de droit international comprenant 19 projets d'articles qui envisagent tous les types de caractéristiques des aquifères (Stephan, 2011). Ces articles font l'objet de cinq résolutions non contraignantes de l'Assemblée générale des Nations Unies[44].

L'Assemblée générale des Nations Unies recommande le projet d'articles à l'attention des gouvernements, « pour qu'ils s'en inspirent aux fins de conclure des accords ou des arrangements bilatéraux ou régionaux relatifs à la bonne gestion des aquifères transfrontières » (Assemblée générale des Nations Unies, 2013, 2016, 2019). Tous les types d'aquifères transfrontaliers y compris les aquifères non alimentés, entrent dans le champ de ces projets d'articles, qui prennent également en compte l'occupation des terres étant donné qu'ils s'appliquent à d'« autres activités qui ont ou sont susceptibles d'avoir un impact » (art.1 §b). En vertu de ces projets d'articles, les principes fondamentaux du droit international de l'eau ont été adaptés aux caractéristiques des aquifères. Ils intègrent des considérations relatives aux aquifères non rechargeables, à la gestion et à la surveillance des nappes souterraines, à la protection des écosystèmes ainsi qu'aux zones de recharge et d'écoulement des aquifères. En 2012, la réunion des parties à la Convention sur l'eau a adopté les Dispositions types sur les eaux souterraines transfrontières (CEE-ONU, 2014), qui s'appuient sur les projets d'articles afin de fournir des orientations pour la mise en œuvre des principes de la Convention en ce qui concerne les nappes souterraines transfrontalières et afin d'améliorer la coopération en matière de gestion intégrée des masses d'eau de surface et souterraines transfrontalières.

12.5 Coopération sur les aquifères transfrontaliers

Les relations transfrontières peuvent impliquer différents niveaux de coopération.

Il existe très peu de cas d'accords interétatiques en vigueur (Burchi, 2018b) concernant les aquifères transfrontaliers : la nappe du Genevois (France, Suisse), le Système aquifère du Sahara septentrional (Algérie, Libye, Tunisie), le système aquifère des Grès de Nubie (Tchad, Égypte, Libye, Soudan), l'aquifère Guarani (Argentine, Brésil, Paraguay, Uruguay), l'aquifère Al Saq-Disi (Jordanie, Arabie saoudite) et la nappe des Calcaires Carbonifères (Belgique, France).

---

42 En vigueur depuis 1996, 44 parties.

43 En vigueur depuis 2014, 37 parties.

44 Ces résolutions sont les suivantes : 63/124, 66/104, 68/118, 71/150 et 74/193 (Assemblée générale des Nations Unies, 2009, 2012, 2013, 2016, 2019). Les projets d'articles sont annexés aux résolutions 63/124 et 68/118.

Souvent, les aquifères transfrontaliers sont inclus dans un accord plus vaste de coopération sur le secteur de l'eau, élaboré pour les bassins fluviaux transfrontaliers. Ces accords plus vastes peuvent s'appliquer aux nappes souterraines transfrontalières à différents niveaux. Ils ne prennent pas nécessairement en compte l'aquifère dans toute son étendue, car la superficie des bassins d'eau de surface ne correspond pas souvent aux systèmes de nappes souterraines sous-jacents.

Des initiatives de coopération scientifique existent dans le monde entier dans le cadre de projets techniques sur les aquifères transfrontaliers. Ces initiatives peuvent avoir des portées diverses ; certaines se concentrent sur une évaluation scientifique conjointe tandis que d'autres s'emparent de la gestion de problèmes particuliers. Dans ce cas, les organisations régionales et internationales, de même que les donateurs, peuvent avoir un rôle essentiel à jouer, notamment lorsque les pays concernés ne sont pas sur un pied d'égalité en termes de capacités, de connaissances, d'informations et de confiance. L'étude de l'Aquifère karstique dinaric, l'un des plus grands systèmes aquifères karstiques au monde, est un exemple de collaboration entre pays. Le projet a facilité la mise en place d'une coopération technique, qui a débouché sur des engagements politiques vis-à-vis de l'adoption des mesures de gestion (encadré 12.2).

Jusqu'à présent, les tentatives pour créer et rendre opérationnelle une institution pleinement fonctionnelle et compétente, chargée de la gouvernance d'un système aquifère transfrontalier, sont restées limitées. Des progrès ont été réalisés récemment dans l'établissement de mécanismes de consultation au sein d'institutions existantes, comme pour l'aquifère de Stampriet (encadré 12.3) partagé par le Botswana, la Namibie et l'Afrique du Sud. L'expérience montre qu'il est possible de mettre en place des dispositifs institutionnels formels favorisant la coopération transfrontière lorsque les pays voisins commencent par se faire confiance en identifiant conjointement leurs besoins et leurs intérêts, et en procédant à des évaluations multidisciplinaires de l'aquifère qu'ils partagent.

En incluant la cible 6.5 des objectifs de développement durable (ODD), le Programme de développement durable à l'horizon 2030 a permis de prendre conscience de la nécessité de « mettre en œuvre la gestion intégrée des ressources en eau [GIRE] à tous les niveaux, y compris au moyen de la coopération transfrontière selon qu'il convient ». L'indicateur 6.5.2 des ODD permet de suivre les progrès accomplis vers la réalisation de la cible 6.5 en évaluant la proportion de bassins transfrontaliers (rivières, lacs et aquifères) couverts par un accord opérationnel de coopération. L'indicateur permet d'évaluer si un aquifère transfrontalier dispose d'un accord spécifique ou s'il est soumis à des accords relatifs aux bassins fluviaux et/ou lacustres ou à des accords bilatéraux plus larges.

Encadré 12.2 Protection et utilisation du Système aquifère karstique dinaric transfrontalier (DIKTAS)

Certains des pays partageant le Système aquifère karstique dinaric transfrontalier (Albanie, Bosnie-Herzégovine, Croatie et Monténégro) ont lancé, en 2010, une action concertée visant à faciliter la gestion équitable et durable du système aquifère ainsi qu'à protéger les écosystèmes uniques qui en dépendent. Le projet a permis d'améliorer les connaissances sur les aquifères karstiques de la région et la coordination entre les pays, les agences et les autres parties prenantes. Premier projet d'envergure à s'intéresser aux aquifères karstiques transfrontaliers à l'échelle mondiale, il a permis d'introduire de nouveaux principes de gestion intégrée pour les aquifères karstiques partagés d'une telle ampleur. Dans le cadre du projet, des actions de gestion régionales ont été identifiées, portant notamment sur les mesures concernant les politiques et la législation, la surveillance et la gestion des données, la formation et la sensibilisation ainsi que les investissements nécessaires.

De plus amples informations sur le projet DITKAS sont disponibles à l'adresse suivante diktas.iwlearn.org/.

Encadré 12.3 Le Mécanisme de coopération multipays pour la gouvernance de l'aquifère de Stampriet, premier mécanisme coopératif pour les aquifères transfrontaliers au sein d'un organisme de bassins fluviaux

Le système aquifère transfrontalier de Stampriet (STAS) se trouve entièrement dans le bassin du fleuve Orange-Senqu, dans une zone partagée par le Botswana, la Namibie et l'Afrique du Sud. En 2017, les pays le partageant ont convenu d'établir un mécanisme de coopération multipays, imbriqué dans la structure de la Commission du bassin du fleuve Orange-Senqu (ORASECOM), qui permette la gestion conjointe des eaux de surface et des eaux souterraines. Ce mécanisme a servi de base à l'institutionnalisation de la coopération pour la gouvernance et la gestion conjointes de l'aquifère. L'aquifère du Stampriet est le premier endroit où a été mis en place un mécanisme de coordination de la gestion d'un aquifère transfrontalier dans la région de l'Afrique australe.

Le manque de connaissances sur les nappes souterraines s'est avéré l'un des principaux freins au calcul de la valeur globale de l'indicateur 6.5.2 des ODD. Trente-cinq des pays ayant rendu compte sur ce point en 2020 n'ont pas pu produire la valeur de l'indicateur pour leurs aquifères. De même, le manque de données sur les nappes souterraines en a sans doute dissuadé d'autres de soumettre un rapport national. En revanche, les efforts déployés par les pays pour rassembler des informations et des données de base sur les aquifères (délimitation des aquifères transfrontaliers par exemple) peuvent constituer un premier pas important vers la sensibilisation à la question des aquifères transfrontaliers et vers la coopération. Le nombre de pays ayant fourni des informations sur les accords de coopération relatifs aux aquifères dans leur rapport a augmenté en 2020 par rapport à 2017 (tableau 12.2). En préparant leurs rapports nationaux, par le biais d'un processus consultatif au niveau national ou avec leurs voisins, les pays ont pu établir de nouveaux programmes de coopération tels que celui concernant le bassin aquifère sénégalo-mauritanien (encadré 12.4).

12.6 Avantages de la coopération transfrontière

La coopération transfrontière en matière d'aquifères peut s'avérer très avantageuse. Par exemple, dans le cas du système aquifère du nord-ouest du Sahara, les pays qui partagent l'aquifère en tirent des avantages sur le plan social, économique et environnemental (CEE-ONU, 2015). À titre d'exemple, on peut évoquer la résilience des communautés locales, accrue par le renforcement des capacités et l'apprentissage mutuel dans le but de résoudre les problèmes communs liés à la rareté des ressources naturelles, à la sécurité, à la sécurité alimentaire et au changement climatique ainsi qu'à la préservation des écosystèmes sensibles des zones humides (Mécanisme de concertation du SASS, 2020).

Le partage des bénéfices liés à l'utilisation des nappes souterraines représente un aspect important de l'hydrodiplomatie (Grech-Madin et al., 2018), un processus qui peut être appliqué à différents stades des interactions entre parties prenantes (de la prévention des tensions à la résolution effective des conflits) et à différents niveaux d'intervention (des dynamiques de pouvoir au niveau local aux dynamiques de pouvoir à l'échelle internationale) (Vij et al., 2020 ; Bréthaut et al., 2019).

Tableau 12.2 Résumé des résultats du suivi global de l'indicateur 6.5.2, 2017 et 2020

	2017	2020
Pays partageant des bassins transfrontiers (fleuves, lacs et aquifères)	153	153
Pays ayant fait rapport sur l'état de leurs accords de coopération transfrontière	107	129
Pays ayant indiqué que 100 % de leurs bassins transfrontaliers sont couverts par des accords de coopération opérationnels	17	24
Pays ayant déclaré avoir au moins un accord de coopération opérationnel spécifique à l'aquifère	5	12
Pays déclarant avoir au moins un aquifère faisant l'objet d'un accord de bassin fluvial ou d'un accord bilatéral opérationnels	36	47

Source : basé sur CEE-ONU/UNESCO (2021).

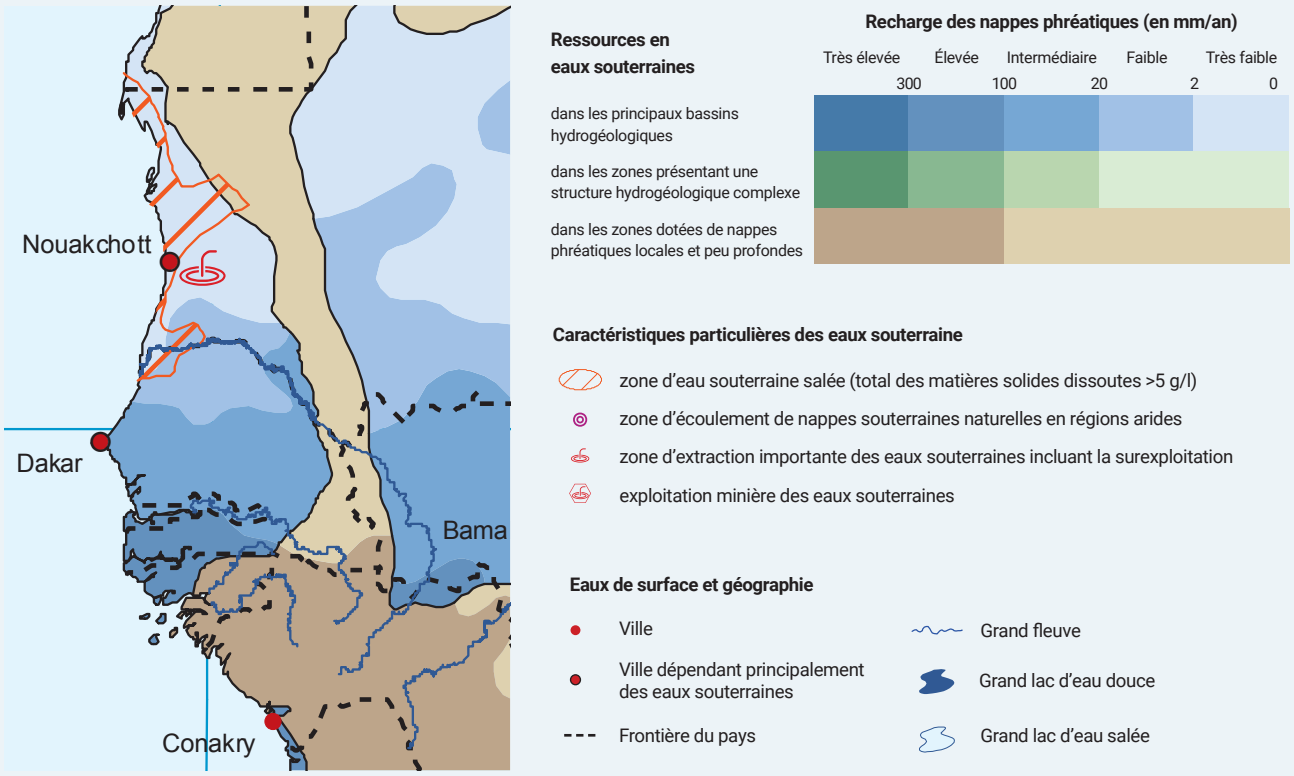
Encadré 12.4 La coopération dans le bassin aquifère sénégalo-mauritanien, une étape vers la promotion de la paix et la résilience entre les États

Le Bassin aquifère sénégalo-mauritanien (BASM), partagé par la Gambie, la Guinée Bissau, la Mauritanie et le Sénégal, s'étend sur environ 1 300 km sous une zone d'une superficie de 331 450 km² où vivent plus de 15 millions de personnes. L'augmentation de la demande en eau causée par la croissance démographique, l'urbanisation rapide et le développement de l'agriculture pour l'autosuffisance alimentaire font peser une pression sur la ressource.

Le premier suivi de l'indicateur 6.5.2 des ODD a révélé que cet aquifère transfrontalier ne fait pas encore l'objet d'un accord ou d'un arrangement bilatéral ou multilatéral de coopération. Les États riverains ont entamé des discussions en vue d'une collaboration transfrontière. Un groupe de travail régional (GTR) pour la coopération transfrontière sur le BASM, regroupant les États ainsi que les organismes de bassins transfrontaliers actifs dans le bassin aquifère sénégalo-mauritanien - à savoir l'Organisation pour la mise en valeur du fleuve Gambie et l'Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal - a été créé en mai 2020. Ce groupe a pour mandat d'assister et de conseiller l'établissement d'une coopération transfrontière pour la gestion conjointe durable du BASM. Le groupe est engagé dans la conception d'un projet et d'un plan d'action afin de remplir ce mandat, avec le soutien du Geneva Water Hub, du Secrétariat de la Convention sur la protection et l'utilisation des cours d'eau transfrontières et des lacs internationaux, assuré par la Commission économique pour l'Europe (CEE-ONU), et du Centre international d'évaluation des ressources en eaux souterraines (IGRAC).

En septembre 2021, les ministres de la Gambie, de la Guinée-Bissau, de la Mauritanie et du Sénégal ont signé une déclaration sur l'établissement d'une coopération institutionnelle transfrontière autour du bassin aquifère sénégalo-mauritanien. Les ministres ont également convenu d'entamer des discussions sur la création d'un mécanisme visant à assurer la gestion concertée et durable de leurs ressources en eaux souterraines partagées.

L'expérience de coopération sur le bassin aquifère sénégalo-mauritanien illustre la manière dont le fait de rendre compte des progrès sur les ODD peut aider les pays à identifier les lacunes de la coopération et conduire à des améliorations concrètes.



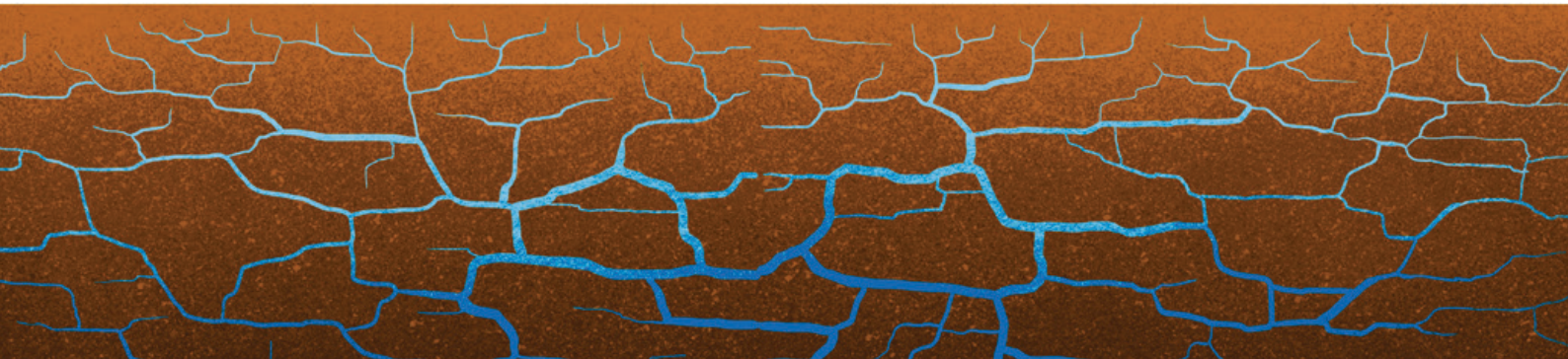
Source : adapté de BGR/UNESCO (2008).

Chapitre 13

Le financement au service de la durabilité

Banque mondiale
Diego Rodriguez et Anna Delgado

Avec les contributions de Francois Bertone, Lucy Lytton et Stuti Sharma (Banque mondiale), Laureen Missaire (CDP) et Alvar Closas (Département de la planification, de l'industrie et de l'environnement de la Nouvelle-Galles du Sud, Australie.)



13.1 Financements disponibles et financements requis

13.1.1 Le niveau d'investissement actuel est insuffisant pour réaliser les cibles de l'ODD 6

Les estimations des investissements nécessaires pour atteindre l'objectif de développement durable (ODD) 6 varient en raison d'un manque de données précises et fiables, mais il est clairement reconnu (Hutton et Varughese, 2016 ; CME, 2018 ; OCDE, 2019b) que le niveau actuel d'investissement est insuffisant pour atteindre les cibles convenues. Les prévisions de financements requis pour les infrastructures d'adduction d'eau, à l'échelle mondiale, en vue d'atteindre l'ODD 6 vont de 6,7 billions de dollars US d'ici à 2030 à 22,6 billions de dollars US d'ici à 2050 (OCDE, 2018). Les estimations montrent également que les gouvernements et les agences de développement ne disposent pas de fonds suffisants pour satisfaire ces exigences (Kolker et al., 2016). L'aide publique au développement (APD) consacrée à l'eau s'élève à environ 13 milliards de dollars US par an — ce qui est bien en deçà des besoins réels (ONU, 2018) — et environ 80 % des pays qui rendent compte des progrès sur l'ODD 6 auprès de l'Organisation des Nations Unies déclarent ne pas disposer d'un financement suffisant pour pouvoir réaliser les objectifs relatifs à l'eau au niveau national (ONU, 2018). Il est nécessaire d'améliorer l'utilisation des fonds publics et des aides existantes afin de catalyser des solutions de financement mixte et mobiliser des formes supplémentaires et innovantes de financements national et international. Le secteur privé et les institutions financières privées internationales doivent également être mis à profit pour combler les déficits de financement.

Les ressources en eaux souterraines sont indispensables à la sécurité et à la prospérité socio-économiques à long terme de même qu'au renforcement de la résilience des systèmes d'approvisionnement en eau

13.1.2 Les données sur les investissements actuels et les investissements requis pour le développement, la gouvernance et la gestion des eaux souterraines sont insuffisantes

Contrairement aux eaux de surface, pour lesquelles les dépenses d'investissement sont généralement assumées par le secteur public, les infrastructures d'exploitation des eaux souterraines sont généralement financées par l'utilisateur final, qu'il s'agisse d'une industrie, d'un foyer, d'un agriculteur ou d'une communauté. Les utilisateurs accèdent directement et de manière décentralisée à la ressource. De ce fait, il est difficile d'assurer le suivi des flux financiers et de rassembler des données sur les investissements ayant trait aux eaux souterraines. L'utilisateur final investit son capital privé pour couvrir le coût de l'accès aux eaux souterraines, coût qui se divise généralement en une part fixe pour un puits et une part variable pour le pompage (Banque mondiale, 2010 ; Projet Gouvernance des ressources en eaux souterraines, 2016a). Dans certains pays, un droit d'extraction ou un tarif pour les eaux souterraines peuvent être applicables, mais ces droits et tarifs reflètent rarement les coûts et la valeur réels de la ressource.

De plus, tandis qu'il existe certaines données sur les budgets publics alloués à la gestion générale des ressources en eau (OCDE, 2012b), les données portant spécifiquement sur les eaux souterraines sont très limitées. Le *Rapport sur l'état d'avancement de la mise en œuvre de l'ODD 6* souligne l'insuffisance des données relatives aux eaux souterraines[45] comme des initiatives de surveillance, insistant sur le fait que la surveillance des nappes souterraines constitue un « domaine négligé » (ONU, 2018 ; ONU-Eau, 2021). Les eaux souterraines sont également considérées comme sous-représentées dans le suivi de la réalisation de l'ODD 6 (ONU-Eau, 2018). Plusieurs rapports (Projet Gouvernance des ressources en eaux souterraines, 2016a, 2016b ; OCDE, 2017b) reconnaissent que le manque de financement est un obstacle à la gestion et la gouvernance des nappes souterraines dans la plupart des pays, y compris ceux où les eaux souterraines représentent une part non négligeable de l'approvisionnement pour les besoins domestiques, d'irrigation, de l'industrie ou de l'exploitation minière.

[45] Sur les 193 États membres invités à fournir des données, seuls 14 pays ont fourni des données relatives au volume des masses d'eaux souterraines et 25 pays ont fourni des données relatives à la qualité des eaux souterraines (ONU, 2018). Dans la version mise à jour, seuls 52 pays possèdent des informations relatives aux eaux souterraines, ce qui est problématique dans la mesure où cette ressource représente bien souvent la majeure partie des réserves d'eau douce d'un pays (ONU-Eau, 2021).

13.2 Établir des sources de financement permanentes, structurelles et adéquates

13.2.1 Des budgets publics suffisants doivent être alloués à l'approvisionnement, la gouvernance et la gestion des nappes souterraines

Les ressources en eaux souterraines sont indispensables à la sécurité et à la prospérité socio-économiques à long terme de même qu'au renforcement de la résilience des systèmes d'approvisionnement en eau. Néanmoins, dans la plupart des pays, on consacre très peu de ressources à la surveillance, à la gestion et à la protection de ces précieuses ressources. Au regard des caractéristiques d'emploi des eaux souterraines et des défis liés à la mesure et à la surveillance, de nombreuses initiatives conduites par les gouvernements échouent ou s'avèrent inefficaces dans l'exploitation, la gouvernance et la gestion des nappes souterraines (Garduño et Foster, 2010 ; Foster et al., 2010c ; Banque mondiale, 2010, 2018a ; Molle et Closas, 2019). Les gouvernements doivent, par conséquent, accepter et assumer leur rôle dans la promotion de la viabilité des ressources en eaux souterraines en tenant compte du contexte local (Garduño et Foster, 2010 ; Foster et al., 2010c ; Banque mondiale, 2010 ; Projet Gouvernance des ressources en eaux souterraines, 2016a, 2016b ; OCDE, 2017b) et utiliser plus efficacement des fonds limités en mettant en œuvre des initiatives bien conçues. De même, les budgets publics devraient, au minimum, financer la surveillance des eaux souterraines — qu'il s'agisse de qualité, de quantité ou des coûts d'exploitation et d'entretien qui y sont liés — et favoriser l'investissement privé en finançant les premiers projets d'exploration et de gestion.

Le stockage et l'extraction des eaux souterraines peuvent être intégrés à la distribution d'eau en zones urbaines afin d'accroître la sécurité et la flexibilité lors des variations saisonnières

13.2.2 Un financement adapté nécessite une reconnaissance de la valeur et du potentiel des eaux souterraines

Les ressources en eaux souterraines ont tendance à être sous-évaluées, surtout dans les zones où leur exploitation n'est pas contrôlée (Garduño et Foster, 2010) et où leur qualité n'est pas protégée. Ces ressources sont utilisées à de multiples fins et offrent de nombreux avantages (figure 13.1). L'exploitation et la gestion durables des nappes souterraines pourraient être mieux intégrées à d'autres projets et initiatives au sein du secteur de l'eau. Par exemple, le stockage et l'extraction des eaux souterraines peuvent être intégrés à la distribution d'eau en zones urbaines afin d'accroître la sécurité et la flexibilité lors des variations saisonnières (Banque mondiale, 2018a). Cela permettrait d'optimiser encore les financements existants, provenant de l'APD, de la facturation des services d'eau et d'assainissement, voire même des partenariats public-privé. Il est également nécessaire d'analyser et de comprendre mieux les coûts et les bénéfices des mesures (et de l'absence de mesures[46]) de gestion des eaux souterraines sur le plan économique, en tenant compte des coûts d'opportunité, des externalités comme des avantages sociaux et environnementaux. Cela pourrait aider à placer les questions relatives aux eaux souterraines en tête de l'agenda politique afin d'obtenir plus d'engagements et de rentabiliser différents types de financement (Projet Gouvernance des eaux souterraines, 2016c).

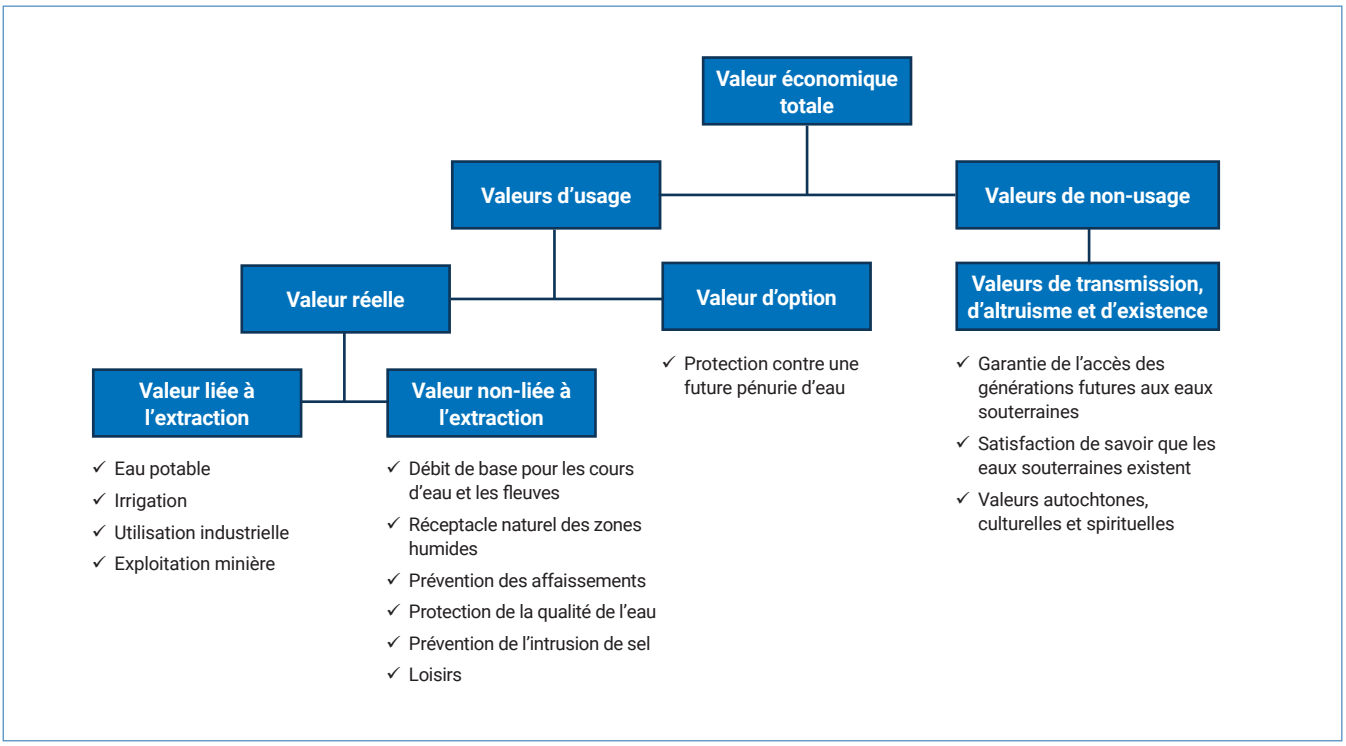
13.3 Utiliser les financements actuellement disponibles à bon escient

13.3.1 Vers des modes d'utilisation plus efficaces et innovants

Si les eaux souterraines constituent une portion non négligeable du volume total distribué par les infrastructures d'approvisionnement en eau, la facturation de l'eau, si elle est correctement conçue, peut financer la gestion des eaux souterraines (pour le cas du Danemark, voir OCDE, 2017b). Cependant, dans la plupart des pays, même le recouvrement des coûts n'est pas aisé (ONU, 2021) et les factures d'eau reflètent rarement les coûts liés à la gestion des ressources en eau. De fait, la gestion des ressources en eau est financée par un mélange de frais d'extraction, de droits ou tarifs, de taxes sur les rejets d'effluents ou la pollution, d'impôts, de fonds publics et d'aide publique au développement (OCDE, 2012b, 2017b ; AEE, 2013).

[46] Le risque contrefactuel associé au scénario d'absence de financement pour les infrastructures d'adduction d'eau devrait également faire partie de l'évaluation de la « bancabilité » et du processus de décision (CME, 2018).

Figure 13.1 Valeur économique totale des eaux souterraines



Source : OCDE (2017b, fig. 1.2, p. 20). Tous droits réservés.

Les droits et/ou tarifs d'extraction des eaux souterraines peuvent être établis sur une base volumétrique, en prenant en considération la valeur économique et la valeur sociale des eaux souterraines à travers le principe du pollueur-payeur, celui du bénéficiaire-payeur ainsi que principes d'équité et de cohérence des politiques (OCDE, 2012b). La tarification peut également reposer sur d'autres paramètres servant d'outils d'évaluation des eaux prélevées (superficie couverte, capacité de pompage, etc. — Molle et Berkoff, 2007 ; AEE, 2013). Les revenus collectés devraient être réservés au financement d'initiatives liées aux eaux souterraines, en rapport avec les infrastructures de surveillance ou les coûts d'exploitation et d'entretien par exemple (encadré 13.1). Il existe des pays appliquant une tarification des eaux souterraines et/ou des droits d'extraction. C'est le cas de certains États membres de l'Union européenne (ARCADIS, 2012 ; AEE, 2013), de l'Australie (Goulburn-Murray Water, 2013), de la Chine, d'Israël, de la Jordanie, du Pérou (encadré 13.1) et des États-Unis (OCDE, 2010a), entre autres. Cependant, dans de nombreux pays, il n'existe ni prix ni redevance pour les eaux souterraines, en particulier lorsqu'elles sont prélevées à des fins d'irrigation, notamment en raison des difficultés liées à la surveillance, à l'application des mesures et à l'importance politique du secteur agricole (ce qui entraîne également un manque de volonté politique). Molle et Berkoff (2007), ARCADIS (2012) et Berbel et.al. (2019) ont travaillé de façon approfondie sur la tarification de l'eau pour l'irrigation (y compris les eaux souterraines).

Compte tenu des difficultés susmentionnées, les moyens de financement traditionnels (tarifs, taxes et transferts) doivent être utilisés plus efficacement et de manière innovante, en association avec d'autres dispositifs, accords et mécanismes afin d'attirer de nouvelles sources de financement qui soutiendront l'extraction, la gouvernance et la gestion des eaux souterraines de façon durable. Les nouvelles technologies telles que la télédétection, les paiements par portables, les cartes magnétiques, le pompage à l'énergie solaire et les compteurs prépayés (encadré 13.2) peuvent aider à améliorer l'efficacité des services de distribution, à réguler l'utilisation des eaux souterraines, à percevoir les versements provenant des tarifications et à impliquer les communautés locales (Projet Gouvernance des ressources en eaux souterraines, 2016a). Les redevances et taxes perçues par d'autres secteurs, comme l'agriculture, peuvent également contribuer à financer les projets relatifs aux

Encadré 13.1 Combiner droits d'exploitation et tarifs d'utilisation en vue d'optimiser la gestion, la surveillance et l'extraction des ressources en eaux souterraines au Pérou

L'Autorité nationale de l'eau (ANA en espagnol) perçoit des droits d'exploitation des eaux de surface et des eaux souterraines de même qu'une redevance sur la pollution de l'eau afin de financer la gestion des ressources en eau. Cette redevance est un outil innovant étant donné qu'elle a été conçue pour prendre en compte le risque de pénurie, qu'elle est fondée sur le principe pollueur-payeur et dépend du volume d'eau consommé. En ce qui concerne les nappes souterraines, les aquifères du Pérou sont classés en trois catégories : sous-exploité, à l'équilibre, et surexploité en fonction du rapport entre demande et disponibilité au niveau de chaque aquifère. Bien que le contrôle des nappes et l'application des lois afférentes se heurtent à des difficultés, l'ANA s'améliore : actuellement, 23 % du total des revenus qu'elle perçoit proviennent des droits et redevances. De plus, en 2018, le Pérou a commencé à instaurer un tarif pour les services de gestion et de surveillance des nappes souterraines à destination des utilisateurs non agricoles qui possèdent leurs propres puits. Ce tarif est facturé par le service des eaux (EPS – *Empresas Prestadoras de Servicios*) et est lié à un plan d'investissement visant à surveiller, à restaurer, à préserver et à gérer les aquifères.

Source : OCDE (2021) et SUNASS (2017)..

Réformer les subventions préjudiciables et les harmoniser avec les politiques relatives aux eaux souterraines devrait faire partie des objectifs de financement du secteur de l'eau

eaux souterraines et à réduire les éventuels impacts négatifs. On peut citer le cas de l'État du Montana (États-Unis) qui impose des frais d'enregistrement des pesticides et des engrais, et emploie ces revenus pour financer des projets de surveillance de la qualité des nappes souterraines (OCDE, 2010b). Les financements mixtes (OCDE, 2019b ; encadré 13.2), les accords de partenariat public-privé ainsi que d'autres mécanismes d'incitation (encadré 13.3) peuvent être utilisés afin d'impliquer le secteur privé, qui viendrait compléter les budgets publics et l'APD dans le financement des projets relatifs aux eaux souterraines. Par exemple, en vertu d'un accord de partenariat public-privé, la ville de San Luis Potosí, au Mexique, est parvenue à protéger son aquifère en traitant et en réemployant les eaux usées, au lieu des eaux souterraines, pour les usages ne nécessitant pas d'eau potable, comme l'agriculture et l'industrie (Banque mondiale, 2018b). Les fonds provenant d'autres secteurs, tels ceux de l'énergie et du climat, peuvent également être mis à contribution pour le financement de projets, notamment les pompes solaires (encadré 13.2) ou les lignes électriques remplaçant le pompage au diésel des puits d'eaux souterraines, et ce afin d'améliorer la fiabilité, réduire les coûts et mieux réguler la consommation dans les zones menacées par l'épuisement des nappes (Projet Gouvernance des ressources en eaux souterraines, 2016c).

13.3.2 Identifier, évaluer et réorienter les subventions aux fins de l'extraction et de la gestion durables des ressources en eaux souterraines

Dans de nombreux pays, les activités financées par des fonds publics dans divers secteurs contribuent à l'épuisement ou à la pollution des nappes souterraines (Garduño et Foster, 2010 ; Projet Gouvernance des ressources en eaux souterraines, 2016a ; OCDE, 2017b ; Banque mondiale, 2018a). À maintes occasions, des subventions sont prévues et mises en œuvre sans tenir compte de l'impact des projets sur la viabilité des nappes souterraines et sur ceux qui dépendent de ces ressources. À titre d'exemple, les subventions dans le secteur de l'énergie qui conduisent à la surexploitation des nappes souterraines, en réduisant les frais d'électricité, ou les subventions agricoles qui encouragent les cultures à forte demande en eau peuvent devenir des incitations perverses (Garduño et Foster, 2010 ; Projet Gouvernance des ressources eaux souterraines, 2016a). De plus, ce type de subvention peut être de nature régressive en ne profitant qu'aux utilisateurs fortunés (Venkanta, 2021 ; Banque mondiale, 2018a). De même, le subventionnement des engrais entraîne leur utilisation excessive et, partant, la contamination des nappes souterraines par les nitrates. De ce fait, il faut assurer la cohérence des politiques des différents secteurs. Réformer les subventions préjudiciables

Encadré 13.2 Combiner un financement mixte et les technologies émergentes pour fournir de l'eau potable à des villages ruraux en Tanzanie

Avec l'appui de la Banque mondiale, le Gouvernement tanzanien aide les associations communautaires pour l'eau et l'approvisionnement à remplacer les vieilles pompes à moteur diésel inefficaces par des pompes solaires photovoltaïques, dans près de 150 villages tanzaniens en zones rurales. L'exploitation et l'entretien des pompes à moteur diésel sont onéreux, ce qui a une incidence directe sur le prix de l'eau, sans oublier les préoccupations liées à l'équité et à la durabilité. Cependant, les associations communautaires pour l'eau et l'approvisionnement n'ont ni les capitaux financiers nécessaires pour investir dans des pompes solaires ni la solvabilité permettant de mobiliser des capitaux sur les marchés financiers. Le Partenariat mondial pour l'aide basée sur les résultats (GPRBA) de la Banque mondiale fournit 60 % du capital sous forme de subventions, le reste étant financé par un prêt de quatre ans auprès de la TIB Development Bank. En outre, les associations utilisent une plateforme innovante de paiement par application mobile et des compteurs prépayés afin de mieux gérer la collecte des revenus provenant de la distribution de l'eau et les remboursements du prêt. Ce projet comporte de multiples avantages, notamment :

- Il se sert de la capacité de financement du secteur privé grâce à des combinaisons de subventions et de prêts ;
- Il apporte des bénéfices environnementaux et économiques par le remplacement des pompes à moteur diésel par des pompes solaires, notamment en réduisant les émissions de CO_2 et les coûts par l'augmentation de la durée de vie des équipements ;
- Il permet à chaque association communautaire d'approvisionnement en eau qui y participe de disposer désormais d'un historique de crédit sur 3 à 5 ans, ce qui constitue une étape importante vers la solvabilité.

Source : Welsien (2016).

et les harmoniser avec les politiques relatives aux eaux souterraines devrait faire partie des objectifs de financement du secteur de l'eau (Garduño et Foster, 2010 ; OCDE, 2018). Les ressources financières tirées de la disparition des subventions perverses peuvent être utilisées pour protéger et restaurer les ressources en eaux souterraines de même que pour aider ceux qui en ont le plus besoin (les groupes vulnérables et défavorisés). Au lieu de subventionner les agriculteurs par la baisse des coûts de l'énergie qui entraîne la surexploitation des nappes souterraines, les gouvernements pourraient subventionner des programmes de promotion de l'utilisation rationnelle de l'eau[47] ou des initiatives communautaires[48] en vue de surveiller et valoriser les ressources en eaux souterraines (Banque mondiale, 2020), ou instaurer le paiement des services environnementaux aux fins de la recharge des aquifères (encadré 13.3), en veillant à ce que les groupes les plus vulnérables tirent profit de toutes ces interventions (Projet Gouvernance des ressources en eaux souterraines, 2016a). À titre d'exemple, les agriculteurs pauvres peuvent devenir les bénéficiaires des paiements pour les écosystèmes, de même que les initiatives dirigées par les communautés ou par les femmes peuvent garantir que les groupes vulnérables soient pris en compte.

[47] « Les études existantes révèlent que les mesures techniques visant à moderniser le système d'irrigation, suivies de la mise en place d'une tarification volumétrique, peuvent générer des économies d'eau plus élevées que la simple hausse des prix » (AEE, 2013, p. 12).

[48] Compte tenu du fait qu'elles ne sont pas centralisées, une forte participation de la communauté est déterminante pour assurer l'extraction, la surveillance et la gestion durables des ressources en eaux souterraines. Impliquer les communautés aide à s'assurer que les groupes les plus vulnérables ne sont pas laissés pour compte (Garduño et Foster, 2010 ; Banque mondiale, 2010, 2018a).

13.3.3. Le rôle des institutions financières internationales

L'impact le plus important des institutions financières sur le secteur de l'eau dépend des activités que celles-ci génèrent à travers leurs prêts, les investissements et leurs souscriptions d'assurance (CDP, 2020). Les banques, les actionnaires, les assureurs et les institutions financières qui sont à l'origine de ceux-ci permettent actuellement aux entreprises de mener des activités économiques qui, dans de nombreux cas, sont profondément néfastes pour l'environnement. Le secteur financier a un rôle particulièrement déterminant à jouer dans la transition vers un monde dans lequel les ressources en eau seront sécurisées (Hogeboom et al., 2018 ; WWF - Fonds mondial pour la nature, 2019). Les institutions financières internationales peuvent offrir des incitations uniques et systémiques en faveur du changement, en veillant à ce que leurs pratiques en matière d'investissement, d'assurance, de prêt, de notation et de commercialisation incitent les consommateurs d'eau à utiliser cette ressource de façon judicieuse, à ne pas la polluer et à en promouvoir la réutilisation (Forum mondial de l'eau, 2019 ; CDP, 2020).

Encadré 13.3 Paiement de services écosystémiques par des fonds du secteur privé : le cas de la ville de Kumamoto au Japon

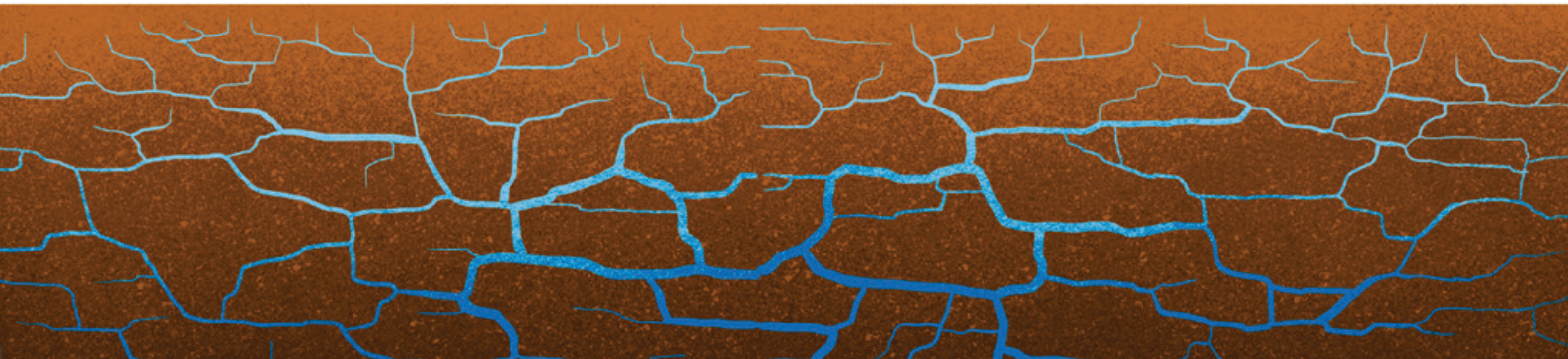
Dans la région de Kumamoto, les nappes souterraines fournissent 100 % de l'eau potable de la ville de Kumamoto ; elles sont également une source d'eau indispensable à l'agriculture et au secteur industriel. Les rizières irriguées de la zone sont la principale source de recharge des nappes souterraines. Toutefois, des mesures gouvernementales sur la restriction de l'approvisionnement limitent la superficie des rizières, ce qui, combiné à l'urbanisation, a contraint certains agriculteurs à abandonner leurs rizières, entraînant ainsi une baisse du niveau des nappes. Une filiale de Sony Semiconductors, qui dépend d'un approvisionnement en eaux souterraines pour ses activités, a passé un accord avec les agriculteurs afin de prévenir l'épuisement des nappes et sécuriser leurs activités commerciales à l'avenir, tout en atteignant la « neutralité en eau ». En utilisant un système de paiement pour les services liés aux écosystèmes (PSE), la société a rémunéré les agriculteurs pour qu'ils rechargent les nappes souterraines, en inondant volontairement les anciennes rizières converties en champs de culture. Le système de PSE a connu un tel succès que les autorités de la ville, le Conseil pour l'utilisation durable de l'eau dans l'agriculture et d'autres industries se sont joints à cette initiative et ont agrandi le programme. Ce cas montre comment les PSE peuvent contribuer à inverser l'épuisement des nappes souterraines et démontre l'importance de la cohérence entre les politiques appliquées à l'agriculture, à l'urbanisation et à l'eau.

Source : OCDE (2017b).

Chapitre 14

Conclusions

WWAP
Richard Connor, Jac van der Gun et Michela Miletto



14.1 Perspectives et défis

14.1.1 Les multiples rôles et facettes des eaux souterraines

Aujourd'hui, les sociétés humaines dépendent largement des eaux souterraines, que ce soit pour répondre à leurs besoins domestiques, produire des aliments ou soutenir leurs économies. Les eaux souterraines fournissent environ 25 % de toute l'eau douce extraite sur Terre. Cependant, elles représentent une part beaucoup plus grande de notre consommation d'eau et nous en tirons des bénéfices globaux plus importants encore. En effet, les eaux souterraines jouent un rôle essentiel pour l'adaptation au changement climatique et l'atténuation de celui-ci ; leur contribution à la réalisation des cibles de l'objectif de développement durable (ODD) 6, ainsi que des autres ODD liés à l'eau, est fondamentale. Et pourtant, les eaux souterraines, comme les bénéfices directs et indirects qu'elles procurent, passent trop souvent inaperçus ou sont ignorés, laissant de nombreux aquifères sans protection adéquate.

Les nappes souterraines constituent la principale source d'approvisionnement de la plupart des grandes villes du monde et de nombreuses plus petites villes. Cette dépendance devrait s'accroître, en particulier dans les zones à urbanisation rapide des pays en développement et des économies émergentes. Par ailleurs, les nappes souterraines constituent également la principale source d'approvisionnement dans la plupart des zones rurales.

L'agriculture dépend de plus en plus des eaux souterraines pour l'irrigation et l'élevage, notamment dans les zones arides et semi-arides. Ces ressources sont particulièrement importantes pour les petits exploitants agricoles et joueront un rôle essentiel pour répondre à la demande alimentaire croissante.

Les eaux souterraines, comme les bénéfices directs et indirects qu'elles procurent, passent trop souvent inaperçus ou sont ignorés, laissant de nombreux aquifères sans protection adéquate

Les eaux souterraines interviennent dans toutes sortes d'industries manufacturières, en particulier lorsque le volume des eaux de surface est limitée et lorsque la qualité de l'eau importe. Elles remplissent de nombreuses fonctions, du traitement au nettoyage en passant par le refroidissement. Les industries qui pratiquent des activités souterraines majeures, telles que les secteurs pétrolier, gazier et minier, interagissent de manière considérable avec les eaux souterraines, les aquifères et l'environnement souterrain, et ont donc une responsabilité particulière dans la protection de ces ressources.

Les écosystèmes et les nappes souterraines fonctionnent de manière interdépendante. L'écologie de nombreux cours d'eau, lacs et zones humides dépend directement des aquifères. Ces écosystèmes dépendants des eaux souterraines (GDE), qui comprennent par ailleurs une grande partie de biomes terrestres, sont essentiels au maintien de la biodiversité. Étant donné que de nombreux GDE alimentent la recharge des aquifères — d'où leur interdépendance —, la protection des écosystèmes (et tout particulièrement les zones humides) est favorable aux nappes souterraines et vice versa. Partout dans le monde, on constate une dégradation des GDE due à l'exploitation intensive des nappes souterraines et à l'absence de mesures de protection.

En raison des volumes considérables d'eaux souterraines qu'ils contiennent (près de 99 % de toutes les réserves d'eau douce liquide de la planète), les aquifères peuvent jouer un rôle de tampon en cas de pénurie d'eau, permettant aux populations de survivre même dans les climats les plus secs. En fonction de leur profondeur et de leurs caractéristiques géologiques (zones supérieures non saturées et couches encaissantes par exemple), les aquifères bénéficient d'une protection relativement efficace contre les accidents de pollution qui se produisent en surface. Cependant, une fois que les eaux souterraines sont contaminées, il peut être extrêmement difficile et coûteux d'y remédier.

14.1.2 Approvisionnement par les services publics et approvisionnement autonome

En règle générale, l'approvisionnement en eau des villes relève de la responsabilité de compagnies d'eau publiques. Cependant, lorsque les services de distribution d'eau peinent à répondre à la demande croissante, le recours aux nappes souterraines de façon autonome — et

souvent autofinancée — constitue une solution rapide dans les zones urbaines où cette option est techniquement réalisable pour ceux qui en ont les moyens. Les nappes souterraines sont également bien adaptées à l'approvisionnement autonome en milieu rural ; elles constituent souvent le moyen d'approvisionnement le plus rentable et le plus fiable pour les villages.

Dans le secteur agricole, les eaux souterraines sont le plus souvent extraites par les agriculteurs eux-mêmes. Il en va de même avec les grands utilisateurs industriels, pour qui l'extraction autonome constitue également la principale méthode d'approvisionnement. Or, l'approvisionnement autonome va de pair avec des processus décisionnels extrêmement fragmentés et difficiles à contrôler.

14.1.3 Les eaux souterraines et l'énergie

À n'en pas douter, l'extraction des eaux souterraines nécessite beaucoup plus d'énergie que la dérivation des eaux de surface, dans la mesure où elle implique de faire remonter l'eau à la surface. En revanche, beaucoup moins d'énergie est requise pour leur transport (la distance moyenne est plus faible entre le site de captage et l'utilisateur) et leur traitement (la qualité de l'eau est généralement bien meilleure). Les systèmes d'irrigation à énergie solaire, installés à grande échelle à un coût abordable pour desservir les exploitations agricoles, pourraient devenir une source d'énergie renouvelable à faible teneur en carbone, qui permette de pomper les eaux souterraines.

Bien que localisées sous la surface terrestre, les eaux souterraines n'échappent pas aux effets du changement climatique

On utilise également les eaux souterraines pour la production d'électricité ainsi que pour la production d'énergie primaire, notamment dans les secteurs du charbon, du pétrole et du gaz. Malheureusement, seuls quelques pays industrialisés disposent de données spécifiques sur ce type d'utilisation des eaux souterraines. Soulignons que l'extraction des ressources souterraines, et les différentes techniques employées pour ce faire, peuvent sévèrement compromettre la qualité des eaux souterraines.

14.1.4 Le changement climatique et les autres défis

Bien que localisées sous la surface terrestre, les eaux souterraines n'échappent pas aux effets du changement climatique. Les changements observés dans le cycle de l'eau sur Terre, au gré des processus de précipitation et d'évaporation, entraînent des répercussions sur la recharge des nappes souterraines. Les aquifères peu profonds ou proches de la surface, que les populations utilisent le plus souvent comme source d'eau douce, sont également les plus vulnérables. Et cependant, les eaux souterraines offrent aussi des solutions pour atténuer le changement climatique et s'y adapter.

En ce qui concerne l'atténuation, les centrales géothermiques se prêtent parfaitement à la production d'un courant électrique de base stable, contrairement aux centrales éoliennes et solaires, et offrent de nombreuses possibilités d'expansion. Il est également possible d'utiliser directement les eaux souterraines pour le chauffage et la climatisation. Certains sites géologiques, notamment les aquifères profonds, sont adaptés au stockage du CO_2 lors des processus de captage et de stockage du carbone. Quant à l'adaptation au changement climatique, les aquifères constituent une alternative relativement peu coûteuse au stockage des eaux de surface et, surtout, ils possèdent une capacité tampon unique, capable de limiter l'impact des variations climatiques de plus en plus marquées et de faciliter la transition progressive vers des pratiques d'utilisation de l'eau compatibles avec l'évolution des conditions climatiques. Dans de nombreuses parties du monde, la mise en place d'un approvisionnement en eau résilient au changement climatique passera par une utilisation conjointe des nappes souterraines et des fleuves, lacs et autres réservoirs d'eau de surface.

En dépit de l'abondance relative des eaux souterraines, de nombreux aquifères à travers le monde sont surexploitées, même lorsqu'ils bénéficient, dans certains cas, d'une recharge substantielle. Cette surexploitation a entraîné une baisse constante des niveaux d'eau, parfois

au-delà des limites d'extraction financièrement réalisable. Outre de réduire la disponibilité globale des ressources en eau douce, la surexploitation intensive des nappes a également provoqué un affaissement des sols dans de nombreuses régions.

L'extraction et l'utilisation des eaux souterraines ne sont pas nécessairement limitées aux eaux souterraines renouvelables. Même les ressources non renouvelables peuvent, elles aussi, entrer en ligne de compte. Certaines régions d'Afrique, par exemple, disposent d'immenses réserves d'eaux souterraines non renouvelables pouvant être utilisées lors de périodes de stress hydrique sévère afin de renforcer la sécurité de l'eau. Cependant, la prudence doit être de mise : il ne faut pas négliger les répercussions économiques, financières et environnementales que pourrait avoir l'épuisement de ces réserves, notamment pour les générations futures.

Partout dans le monde, la pollution des nappes souterraines constitue un problème majeur. Dans les zones urbaines et autres établissements humains, on recense de nombreuses sources de pollution. L'existence d'installations sanitaires mal conçues et mal entretenues conduit à la contamination pathogène de l'eau extraite à partir de puits peu profonds situés à proximité ; c'est en particulier le cas dans les zones rurales. Néanmoins, la principale cause de pollution des nappes souterraines en zones rurales demeure l'agriculture. Il est donc urgent de redoubler d'efforts pour lutter contre la pollution, que ce soit en milieu urbain ou rural. Le secteur industriel, y compris ses activités souterraines telles que l'exploitation des hydrocarbures et les diverses formes d'exploitation minière, produit un large éventail de polluants, susceptibles de sévèrement compromettre la qualité des nappes souterraines. Dans tous les secteurs, la protection de la qualité des eaux souterraines doit impérativement être assurée par une réglementation efficace et strictement appliquée ; malheureusement, il est encore rare que des pratiques appropriées soient mises en œuvre.

14.1.5 Données, informations et connaissances sur les eaux souterraines et les aquifères

Dans de nombreux pays, le manque d'informations et de connaissances approfondies sur les ressources locales en eaux souterraines constitue un défi majeur. Le *Rapport sur l'état d'avancement de la mise en œuvre de l'objectif de développement durable 6* soulève le problème que constitue le manque de données sur les nappes souterraines et le manque de projets de surveillance de celles-ci, insistant sur le fait que la surveillance des eaux souterraines est un « domaine négligé ». Mis à part en Europe, en Amérique du Nord et dans les grands pays d'Asie tels que l'Inde et la Chine, seuls quelques pays surveillent régulièrement le niveau ou la qualité des nappes souterraines, ce qui constitue pourtant la première étape de la gestion de celles-ci.

14.2 Aller de l'avant

14.2.1 Les eaux souterraines doivent figurer au rang des priorités

L'Assemblée générale des Nations Unies et le Conseil des droits de l'homme ont reconnu l'accès équitable à l'eau potable et à l'assainissement comme deux droits humains fondamentaux. Les États Membres de l'ONU se doivent de faire respecter ces droits à l'eau potable et à l'assainissement au moyen de plans d'action ou de stratégies, en favorisant activement la sensibilisation et le renforcement des capacités. Une attention toute particulière doit être accordée, entre autres, à la durabilité de l'approvisionnement en eau, au traitement préalable à la consommation lorsque la qualité brute est insuffisante, de même qu'à la protection des nappes souterraines et de la recharge des aquifères, étant donné que les eaux souterraines constituent une composante essentielle de l'approvisionnement et de l'assainissement.

Les eaux souterraines jouent un rôle majeur dans de nombreux secteurs tels l'agriculture, l'industrie et l'environnement, contribuant à la bonne santé des économies, des revenus, des populations et des écosystèmes. C'est pourquoi il est nécessaire de mettre en place des gardiens proactifs et compétents de cette ressource afin d'assurer la durabilité des services fournis par les eaux souterraines.

14.2.2 Une gouvernance et une gestion efficaces des nappes souterraines sont essentielles

Les pays doivent impérativement s'engager à instaurer un cadre approprié et efficace pour la gouvernance des eaux souterraines. Pour cela, les gouvernements doivent prendre l'initiative et prendre la responsabilité de mettre en place — et de maintenir — une structure de gouvernance pleinement opérationnelle, comprenant des connaissances de base, une capacité institutionnelle, des lois, des règlements et leurs outils d'application, des politiques et une planification, une participation des parties prenantes ainsi que des financements appropriés. Il incombe également aux pays de veiller à ce que leurs politiques et leurs plans soient pleinement mis en œuvre dans le cadre de la gestion des eaux souterraines.

14.2.3 L'exploitation et la gestion des nappes souterraines doivent reposer sur des données, des informations et des connaissances fiables

Aujourd'hui, le savoir scientifique en hydrogéologie comme les méthodes et les outils existants sont suffisants pour résoudre la plupart des problèmes de gestion des nappes souterraines comme choisir l'emplacement des puits, optimiser l'extraction et prévoir ses effets à l'échelle locale et régionale ainsi que prévenir la pollution. La difficulté réside davantage dans le manque de données fiables sur les eaux souterraines d'une zone donnée, en particulier dans les pays à faible revenu, et dans le partage limité des données, des informations et des connaissances entre chercheurs, praticiens et décideurs. Pour apporter des réponses efficaces, les gouvernements doivent avant tout créer et enrichir une base de connaissances dédiée aux eaux souterraines.

En ce qui concerne l'exploration et l'évaluation des aquifères, les données et informations collectées par les organismes chargés des eaux souterraines peuvent être complétées en faisant appel au secteur privé. Les industries pétrolières et minières, pour ne citer qu'elles, disposent d'un grand nombre de données, d'informations et de connaissances sur la composition des couches géologiques profondes, notamment les aquifères. Il est donc grandement souhaitable qu'elles les partagent avec les professionnels du secteur public en charge de l'évaluation et de la gestion des eaux souterraines. La surveillance des nappes souterraines, qui vient compléter les activités d'exploration et d'évaluation, revêt également un caractère fondamental. Il lui faut fournir des informations spatiales précises sur l'évolution chronologique des niveaux des nappes de même que des informations sur les extractions et la qualité des eaux souterraines — informations essentielles pour étayer les décisions relatives à l'exploitation et à la gestion.

14.2.4 Pour améliorer la gestion des eaux souterraines, des institutions fortes seront déterminantes

Il est souvent difficile de trouver du personnel qualifié capable d'effectuer des études hydrogéologiques et géophysiques. Pourtant, le choix de l'emplacement et la construction des forages à haut rendement nécessaires à l'irrigation à grande échelle ou à l'approvisionnement des villes, dans des environnements hydrogéologiques complexes, exigent une expertise considérable. Il en va de même pour les activités telles que l'élaboration de politiques et la planification en matière d'eaux souterraines ainsi que pour la mise en œuvre et l'application des mesures de gestion de ces eaux.

Toutefois, dans de nombreux pays, le manque chronique d'experts en eaux souterraines parmi le personnel des institutions et des administrations locales et nationales, ainsi que des mandats trop restreints, un financement insuffisant et un manque de soutien des départements ou organismes responsables des eaux souterraines, entravent l'évaluation, la surveillance, la planification, l'exploitation et la gestion efficaces des eaux souterraines. La mise en place de projets de coopération bilatérale à long terme, de programmes d'échanges universitaires ou de formations postuniversitaires à l'étranger, entre autres, pourrait permettre de renforcer, par la formation, les capacités des personnes comme des institutions. Pour cela, les gouvernements doivent s'engager à créer, appuyer et renforcer les capacités institutionnelles en lien avec les eaux souterraines.

14.2.5 Prendre en compte les intérêts divergents de toutes les parties prenantes

Le fait que les ressources en eaux souterraines constituent un bien commun, le manque d'informations et la diversité des parties prenantes et de leurs intérêts peuvent rendre la gouvernance et la gestion des eaux souterraines difficiles. Étant donné que les nappes souterraines sont accessibles depuis de vastes zones géographiques, les gouvernements ont souvent du mal à quantifier, allouer et réglementer les extractions, en particulier si leurs ressources financières sont limitées. Par conséquent, dans la plupart des cas, la gouvernance et la gestion des eaux souterraines doivent tenir compte des intérêts des parties prenantes publiques et privées ainsi que des communautés locales. Les eaux souterraines étant un bien commun, il est impératif que les gouvernements assument pleinement la responsabilité qui leur incombe, en tant que gardiens de cette ressource, et veillent à ce que l'accès aux eaux souterraines (et aux avantages qui en découlent) soit équitablement réparti et que les générations futures puissent en bénéficier. Lorsque cela est possible, la participation des parties prenantes aux processus d'évaluation, de surveillance, de planification et de prise de décision présente un intérêt indéniable.

Les eaux souterraines étant un bien commun, il est impératif que les gouvernements assument pleinement la responsabilité qui leur incombe, en tant que gardiens de cette ressource, et veillent à ce que l'accès aux eaux souterraines (et aux avantages qui en découlent) soit équitablement réparti et que les générations futures puissent en bénéficier

14.2.6 Les dispositions juridiques clarifient les droits et règles coutumiers dans le domaine des eaux souterraines

La gouvernance et la gestion des eaux souterraines doivent reposer sur des lois et des réglementations qui intègrent les objectifs sociétaux et politiques, et qui établissent un cadre réglementaire propice à la réalisation de ces objectifs. Disposer de cadres juridiques stables permet également aux gouvernements et aux utilisateurs des eaux souterraines de planifier la gestion des ressources sur le long terme et de composer avec des intérêts concurrentiels, notamment ceux de l'environnement et des générations futures. Le droit international de l'eau définit les droits et obligations des États souverains à l'égard des fleuves, des lacs, des bassins et des aquifères qui sont traversés, formés ou passent sous (dans le cas des nappes souterraines) une frontière internationale. Depuis peu, ce droit s'intéresse tout particulièrement aux aquifères et aux nappes souterraines et plusieurs accords entre pays partageant des aquifères et des nappes souterraines transfrontalières ont été conclus.

Au nombre des instruments juridiques visant à contrôler l'extraction des eaux souterraines figurent l'obligation de détenir un permis pour la construction de puits et le prélèvement d'eau ainsi que l'obligation de payer une compensation financière pour les volumes d'eau prélevés et des taxes incluses dans le prix de l'eau distribuée.

Afin de prévenir la pollution des nappes souterraines, il existe des mesures visant à interdire ou à limiter certaines activités polluantes et consommatrices d'eau, à limiter l'épandage de pesticides, d'herbicides et d'engrais, à restreindre certains modes de culture, à réduire le pâturage, à remettre en état les terres agricoles et à gérer le drainage. L'émission et le rejet illégaux de substances dans les masses d'eau ou dans le sol, ou le traitement illégal des eaux usées, peuvent être considérés comme un délit ou un crime. L'application de ces mesures dépend toutefois de l'application de réglementations fondées sur la législation. Les efforts pour faire respecter la réglementation et poursuivre en justice les pollueurs sont souvent difficiles à mettre en œuvre en raison de l'invisibilité des nappes souterraines.

14.2.7 Les aquifères transfrontaliers nécessitent une coopération

Les aquifères transfrontaliers (c'est-à-dire les aquifères qui s'étendent sous la surface de deux pays ou plus) requièrent une attention particulière étant donné qu'un pays voisin peut être à l'origine de la pollution des eaux souterraines ou de changements dans les niveaux ou la pression des nappes. La gouvernance et la gestion des eaux souterraines prennent ainsi une autre dimension plus complexe. La communauté internationale a pris conscience de l'importance de ces aquifères récemment, ce qui ouvre de nouvelles possibilités de promouvoir la coopération transfrontalière grâce à des ressources financières dédiées. À ce jour, les efforts de coopération ont abouti à la réalisation d'inventaires mondiaux et régionaux, à l'élaboration d'un Projet d'articles sur le droit des aquifères transfrontières (salué par

plusieurs résolutions de l'Assemblée générale des Nations Unies) ainsi qu'à la conclusion d'accords de coopération interétatiques officiels en vigueur pour six aquifères transfrontaliers. Néanmoins, on dénombre plusieurs centaines d'aquifères transfrontaliers majeurs dans le monde. Collectivement, ils représentent une part importante des ressources mondiales en eaux souterraines et nombre d'entre eux s'inscrivent dans des écosystèmes d'eau douce très précieux. Il est donc impératif de redoubler d'efforts en vue d'instaurer une coopération sur les aquifères transfrontaliers.

14.2.8 Les politiques et la planification sont les guides d'une action concertée

Toute l'attention nécessaire doit être accordée aux politiques et à la planification afin de fournir des orientations à la gouvernance ainsi qu'à des activités cohérentes et concertées de gestion des eaux souterraines, qui bénéficieront à l'ensemble de la société. Les politiques relatives aux eaux souterraines doivent tenir compte du statut juridique et du régime de propriété qui régissent les eaux souterraines (publique ou privée), du type d'utilisateurs, des caractéristiques des eaux de surface interdépendantes et de l'emploi des terres autour des zones de recharge des aquifères. Elles doivent également permettre une prise de décision intégrée sur les ressources en eaux souterraines et les systèmes aquifères, et assurer un lien avec d'autres secteurs et domaines de la société au-delà du secteur de l'eau — notamment le développement socio-économique, l'égalité des genres et la réduction de la pauvreté, l'alimentation et l'énergie, les écosystèmes, le changement climatique et la santé humaine.

En matière de gestion des eaux souterraines, des processus de planification plus ouverts et plus participatifs permettront de concevoir des plans, et par extension une gestion opérationnelle, qui soient davantage soutenus et acceptés par le public

En matière de gestion des eaux souterraines, des processus de planification plus ouverts et plus participatifs permettront de concevoir des plans, et par extension une gestion opérationnelle, qui soient davantage soutenus et acceptés par le public. Une telle planification impliquera des scientifiques, des spécialistes de la gestion des ressources, les parties prenantes et les décideurs, en restant accessible aux non-spécialistes ainsi qu'aux utilisateurs. En effet, la planification pour les ressources en eaux souterraines concerne aussi bien les organismes gouvernementaux que les utilisateurs finaux, de façon collective ou individuelle. À l'échelle locale, la collecte de données et l'analyse des informations seront nécessairement limitées ; le renforcement des capacités et la sensibilisation peuvent toutefois être utiles à tous les niveaux. De même, les données ventilées par sexe et la participation des femmes à la production des données et à la prise de décision (généralement sous la responsabilité des hommes) sont essentielles à l'obtention à une répartition équilibrée.

Les plans de gestion des eaux souterraines traduisent les politiques en programmes d'action qui guident leur mise en œuvre. Divers outils sont applicables pour gérer les extractions d'eaux souterraines. Le choix de ces outils dépendra de la méthode de gestion définie par les régimes de gouvernance et de politique en place. La gestion n'est pas toujours l'apanage des gouvernements : ainsi, les communautés et/ou les utilisateurs des ressources en eaux souterraines peuvent choisir, de manière indépendante, de gérer l'emplacement des puits et les extractions d'eau. Dans les régions où les eaux souterraines ont été historiquement très peu réglementées, voire pas du tout, leurs utilisateurs peuvent considérer les mesures de gestion comme une forme d'expropriation par rapport à ce qu'ils considèrent leur appartenant. Autoriser, de façon dérogatoire, certaines utilisations (domestique, élevage) ou un certain volume de pompage inframarginal (soit un volume autorisé et généralement faible, qui peut être pompé sans être soumis à des réglementations ou à des tarifs, généralement dans le but de satisfaire les besoins humains fondamentaux ou pour l'agriculture à l'échelle d'un foyer) peut aider à surmonter la résistance au contrôle par la réglementation et la tarification. Cependant, il faut veiller à ce que les utilisations dérogatoires ne nuisent pas aux objectifs de gestion des eaux souterraines. L'équité est une considération importante, car les mesures de gestion qui affectent différemment ceux qui pompent et utilisent les eaux souterraines peuvent entraîner des conflits.

Les interactions entre les aquifères et les eaux de surface, l'emploi des terres, les écosystèmes, et l'utilisation du sous-sol et de ses ressources supposent que les politiques et la planification en matière d'eaux souterraines soient intégrées à un cadre politique plus large (soit une intégration horizontale), car chacun de ces éléments influe sur la disponibilité et la qualité des eaux souterraines. Il existe des méthodes, comme la gestion de la recharge des aquifères (MAR) ou la gestion conjointe de l'eau, qui tiennent compte de ces interactions. La possibilité et la faisabilité de l'exploitation des ressources en eaux souterraines non conventionnelles (eaux souterraines saumâtres, eaux souterraines douces ou saumâtres situées au large des côtes par exemple) méritent également d'être explorées.

14.2.9 Le financement, un levier d'action

La gouvernance et la gestion des eaux souterraines supposent un financement structurel conséquent. Toutefois, les mécanismes d'allocation de fonds publics ou de collecte de fonds auprès d'investisseurs privés sont, dans bien des cas, insuffisamment développés. Dans de nombreux pays, aucun prix ou tarif n'est appliqué aux eaux souterraines, en particulier lorsqu'elles sont utilisées à des fins d'irrigation, notamment en raison des difficultés liées à la surveillance, à l'application des mesures et à l'importance politique du secteur agricole (ce qui entraîne également un manque de volonté politique).

Lorsque les nappes souterraines participent des infrastructures d'approvisionnement en eau, le tarif de l'eau, s'il est correctement appliqué, peut permettre de financer la gestion des eaux souterraines. Cependant, même le recouvrement des coûts pose problème dans la plupart des pays et les factures d'eau reflètent rarement les dépenses associées à la gestion des ressources en eau. Ce pourquoi la gestion des ressources en eau est financée par un mélange de frais d'extraction, de droits ou tarifs, de taxes sur les rejets d'effluents ou la pollution, d'impôts, de fonds publics et d'aide publique au développement (APD). En outre, l'exploitation et la gestion durables des nappes souterraines pourraient être mieux intégrées à d'autres projets et initiatives au sein du secteur de l'eau. Par exemple, les projets MAR peuvent être intégrés à la distribution d'eau en zones urbaines afin d'accroître la sécurité et la flexibilité lors des variations saisonnières de la ressource. De même, il est nécessaire d'analyser et de comprendre mieux les coûts et les bénéfices des mesures (et de l'absence de mesures[49]) de gestion des eaux souterraines sur le plan économique, en tenant compte des coûts d'opportunité, des externalités comme des avantages sociaux et environnementaux. Cela pourrait aider à placer les questions relatives aux eaux souterraines en tête de l'agenda politique afin d'obtenir plus d'engagements et de rentabiliser différents types de financement.

14.3 Coda

L'ensemble des ressources en eaux souterraines de la Terre représentent une réserve d'eau douce considérable. Dans un monde où la demande en eau ne cesse de croître, où les ressources en eaux de surface sont souvent rares et de plus en plus sollicitées, la valeur des eaux souterraines, qui ont permis aux sociétés humaines de prospérer depuis plusieurs millénaires, est en passe d'être universellement reconnue.

Toutefois, en dépit de leur abondance relative, les eaux souterraines restent exposées à la surexploitation et à la pollution, deux phénomènes qui peuvent avoir des effets dévastateurs sur cette ressource et sa disponibilité. Mettre à profit tout le potentiel des eaux souterraines nécessitera donc des efforts substantiels et concertés afin d'assurer une gestion et une utilisation durables de cette ressource. Pour y parvenir, commençons par rendre visible l'invisible.

[49] Le risque contrefactuel associé au scénario d'absence de financement pour les infrastructures d'adduction d'eau devrait également faire partie de l'évaluation de la « bancabilité » et du processus de décision (CME, 2018).

Références

A

Abd-El-Mooty M., Kansoh R. et Abdulhadi A. 2016. « Challenges of water resources in Iraq ». *Hydrology Current Research,* vol. 07, nº 4. doi.org/10.4172/2157-7587.1000260

Abdolvand B., Mez L., Winter K., Mirsaeedi-Gloßner S., Schütt B., Rost K. T. et Bar, J. 2015. « The dimension of water in Central Asia: Security concerns and the long road of capacity building ». *Environmental Earth Sciences*, vol. 73, nº 2, p. 897 à 912. doi.org/10.1007/s12665-014-3579-9

Abidin H. Z., Andreas H., Gumilar I., Fukuda Y., Pohan Y. E. et Deguchi T. 2011. « Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development ». *Natural Hazards*, vol. 59, art. 1 753. doi.org/10.1007/s11069-011-9866-9

Accord relatif à la gestion du système aquifère Guarani (GAA). 2020. *Guarani Aquifer Agreement*. www.internationalwaterlaw.org/documents/regionaldocs/Guarani_Aquifer_Agreement-English.pdf

Adler R. F., Huffman G. J., Chang A., Ferraro R., Xie P., Janowiak J., Rudolf B., Schneider U., Curtis S., Bolvin D., Gruber A., Susskind J., Arkin P. et Nelkin E. 2003. « The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-Present) ». *Journal of Hydrometeorology*, vol. 4, p. 1147 à 1167. doi.org/10.1175/1525-7541(2003)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2

AEE (Agence européenne pour l'environnement). 2013. *Assessment of Cost Recovery through Water Pricing*. Rapport technique de l'AEE nº 16/2013. Luxembourg, Office des publications de l'Union européenne. www.eea.europa.eu/publications/assessment-of-full-cost-recovery

_____. 2018a. *Groundwater Quantitative and Chemical Status*. Dashboard (Tableau). Site Web de l'AEE. www.eea.europa.eu/themes/water/european-waters/water-quality-and-water-assessment/water-assessments/groundwater-quantitative-and-chemical-status

_____. 2018b. *European Waters: Assessment of Status and Pressures 2018*. Rapport de l'AEE nº 7/2018. Luxembourg, Office des publications de l'Union européenne. doi.org/10.2800/303664

_____. 2019. *The European Environment — State and Outlook 2020. Knowledge for Transition to a Sustainable Europe*. Luxembourg, Office des publications de l'Union européenne. doi.org/10.2800/96749

AfD (Agence française de développement). 2011. *Vers une gestion concertée des systèmes aquifères transfrontaliers*. À Savoir. Paris, AfD. www.afd.fr/fr/ressources/vers-une-gestion-concertee-des-systemes-aquiferes-transfrontaliers

Aguilar-Barajas I., Mahlknecht J., Kaledin J., Kjellén M. et Mejía-Betancourt A. (éds.). 2015. *Water and Cities in Latin America: Challenges for Sustainable Development*. Abingdon, Royaume-Uni, Routledge.

AGW-Net/BGR/IWMI/CapNet/RAOB/IGRAC (Le Réseau Eaux Souterraines en Afrique/Institut fédéral allemand des géosciences et des ressources naturelles/Institut international de gestion des ressources en eau/CapNet/Réseau africain des Organismes de bassin/Centre international d'évaluation des ressources en eaux souterraines). 2015. Intégration de la gestion des eaux souterraines dans les Organismes de Bassin Transfrontalier en Afrique - *Manuel des formations* par *by AGW-Net, BGR, IWMI, CapNet, ANBO, & IGRAC.* www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/Training%20Manual%20Integration%20de%20la%20Gestion%20des%20Eaux%20Souterraines_0.pdf

Ahmed K. M., Islam R., Hasan M. A., Sultana S., Groen K., Tuinhof A., Winkle T., Onabolu B., Akhter N., Mahmud M. N. et Rahman M. S. 2018. « A nature-based, innovative and low-cost solution for disaster-resilient drinking water supply in coastal Bangladesh: Using managed aquifer recharge (MAR) to buffer water storage and shield against saltwater ingress ». Groundwater Solutions Initiative for Policy and Practice (GRIPP), Groundwater-Based Natural Infrastructure. gripp.iwmi.org/natural-infrastructure/water-quality-2/a-nature-based-innovative-and-low-cost-solution-for-disaster-resilient-drinking-water-supply-in-coastal-bangladesh/

AIE (Agence internationale de l'énergie). 2016a. *Water-Energy Nexus, Excerpt from the World Energy Outlook 2016*. Paris, OCDE/AIE. www.iea.org/reports/water-energy-nexus

_____. 2016b. *Key World Energy Statistics 2016*. Paris, AIE. doi.org/10.1787/key_energ_stat-2016-en

_____. 2019a. *Africa Energy Outlook 2019. Extrait du World Energy Outlook Special Report 2019.* Paris, AIE. www.iea.org/reports/africa-energy-outlook-2019

_____. 2019b. *Renewables 2019 : Analysis and Forecast to 2024*. Paris, AIE. doi.org/10.1787/b3911209-en

AIH (Association internationale des hydrogéologues). 2005. *Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in Semi-Arid Areas.* Paris, UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000143819?1=null&queryId=876e1340-864a-48fd-9bbd-1b672f0de516

_____. 2015. *Resilient Cities & Groundwater*. Série d'aperçus stratégiques de l'AIH. iah.org/wp-content/uploads/2015/12/IAH-Resilient-Cities-Groundwater-Dec-2015.pdf

_____. 2017. *The UN-SDGs for 2030: Essential Indicators for Groundwater*. AIH. iah.org/wp-content/uploads/2017/04/IAH-Groundwater-SDG-6-Mar-2017.pdf

_____. 2018. *Mining Enterprises & Groundwater*. Série d'aperçus stratégiques de l'AIH. iah.org/wp-content/uploads/2018/12/IAH_SOS_MiningEnterprisesGroundwater.pdf

Alam M. F. et Foster S. 2019. « Policy priorities for the boom in urban private wells ». *The Source*, novembre 2019, p. 54 à 57. www.thesourcemagazine.org/policy-priorities-for-the-boom-in-urban-private-wells/

Albrecht T. R., Varady R. G., Zuniga-Teran A. A., Gerlak A. K. et Staddon C. 2017. « Governing a shared hidden resource: A review of governance mechanisms for transboundary groundwater security ». *Water Security*, vol. 2, p. 43 à 56. doi.org/10.1016/j.wasec.2017.11.002

Allan, J. A. 1998. « Virtual water: A strategic resource: Global solutions to regional deficits ». *Groundwater,* vol. 36, nº 4, p. 545 à 546.

_____. 2003. « Virtual water — the water, food and trade nexus. Useful concept or misleading metaphor? » *Water International*, vol. 28, nº 1, p. 106 à 113. doi.org/10.1080/02508060.2003.9724812

Allan R. P., Soden B. J., John V. O., Ingram W. et Good P. 2010. « Current changes in tropical precipitation ». *Environmental Research Letters*, vol. 5, nº 2, art. 025205. doi.org/10.1088/1748-9326/5/2/025205

Allen D. M., Whitfield P. H. et Werner A. 2010. « Groundwater level responses in temperate mountainous terrain: Regime classification, and linkages to climate and streamflow ». *Hydrological Processes*, vol. 24, nº 23, p. 3392 à 3412. doi.org/10.1002/hyp.7757

Al-Muraikhi A. A. et Shamrukh M. 2017. *Historical Overview of Enhanced Recharge of Groundwater in Qatar.* Association internationale des hydrogéologues (AIH). recharge.iah.org/files/2017/11/Qatar-MAR-history-short-paper-29nov17.pdf

Al-Rukaibi D. 2010. *The Role of Aquifer Storage and Recovery (ASR) Technique in Sustainability: A Case Study for Kuwait.* Thèse de doctorat. Austin, Texas, Université du Texas à Austin. repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/10898/CRWR%20online%20report%2010-10.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Altchenko Y. et Villholth K. G. 2015. « Mapping irrigation potential from renewable groundwater in Africa — A quantitative hydrological approach ». *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 19, nº 2, p. 1055 à 1067. doi.org/10.5194/hess-19-1055-2015

Al-Zubari W. 2014. Regional Diagnostic Report: Arab States Region. Rapport de synthèse. ar.unesco.org/sites/default/files/gwg_arab_region_regionaldiagnosis_report.pdf

Al-Zubari W. et Alajjawi S. 2020. *Promoting an EU-GCC Climate Change Agenda: Water Security Priorities*. Institut Bussola. www.bussolainstitute.org/research/promoting-an-eu-gcc-climate-change-agenda-water-security-priorities

Al-Zubari W., Al-Turbak A., Zahid W., Al-Ruwis K., Al-Tkhais A., Al-Muataz I. , AbdelWahab A., Murad A., Al-Harbi M. et Al-Sulaymani Z. 2017. « An overview of the GCC Unified Water Strategy (2016-2035) ». *Desalination and Water Treatment*, vol. 81, p. 1 à 18. doi.org/10.5004/dwt.2017.20864

Amanambu A. C., Obarein O. A., Mossa J., Li L., Ayeni S. S., Balogun O., Oyebamiji A. et Ochege F. U. 2020. « Groundwater system and climate change: Present status and future considerations ». *Journal of Hydrology*, vol. 589, art. 125163. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125163

Andres L., Chellaraj G., Das Gupta B., Grabinsky J. et Joseph G. 2018. *Why Are So Many Water Points in Nigeria Non-Functional?: An Empirical Analysis of Contributing Factors*. Policy Research Working Paper No. 8388. Washington, D.C., Banque mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/29568. Licence : CC BY 3.0 IGO.

Aquastat. n.d. *AQUASTAT — Système d'information mondial de la FAO sur l'eau et l'agriculture.* Rome, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). www.fao.org/aquastat/fr/ (consulté entre avril et septembre 2021).

ARCADIS. 2012. *Le Rôle des tarifications de l'eau et de la répartition de l'eau dans l'agriculture*. Rapport final. Commission européenne. ec.europa.eu/environment/water/quantity/pdf/agriculture_report.pdf

Arlosoroff S., Tschannerl G., Grey D., Journey W., Karp A., Langenegger O. et Roche R. 1987. *Community Water-Supply: The Hand-Pump Option*. Washington, D.C., Banque mondiale. documents.worldbank.org/curated/en/299321468765272889/Community-water-supply-the-handpump-option

Arroyo V., Ballestero M. et Mejía A. 2015. « Inseguridad económica del agua en Latinoamérica: De la abundancia a la inseguridad » [L'insécurité économique des ressources en eau en Amérique latine : De l'abondance à l'insécurité]. Caracas, Société andine de développement (SAD). scioteca.caf.com/handle/123456789/787 (en espagnol).

Arthington A. H., Bhaduri A., Bunn S. E., Jackson S. E., Tharme R. E., Tickner D., Young B., Acreman M., Baker N., Capon S., Horne A. C., Kendy E., McClain M. E., Leroy Poff N., Richter B. D. et Ward S. 2018. « The Brisbane Declaration and Global Action Agenda on Environmental Flows ». *Frontiers in Environmental Science*, vol. 6, art. 45, p. 1 à 15. doi.org/10.3389/fenvs.2018.00045

Ashfaq M., Shi Y., Tung W., Trapp R. J., Gao X., Pal J. S. et Diffenbaugh N. S. 2009. « Suppression of south Asian summer monsoon precipitation in the 21st century ». *Geophysical Research Letters*, vol. 36, nº 1, art. L01704. doi.org/10.1029/2008GL036500

Asoka A., Gleeson T., Wada Y. et Mishra V. 2017. « Relative contribution of monsoon precipitation and pumping to changes in groundwater storage in India ». *Nature Geoscience*, vol. 10, nº 2, p. 109 à 117. doi.org/10.1038/ngeo2869

Assemblée générale des Nations Unies. 2007. *Déclaration des Nations Unies sur les droits des peuples autochtones*. Résolution adoptée par l'Assemblée générale le 13 septembre 2007. Soixante et unième session. A/RES/61/295. undocs.org/fr/A/res/61/295

_____. 2009. *Le droit des aquifères transfrontières*. Résolution adoptée par l'Assemblée générale le 11 décembre 2008. Soixante-troisième session. A/RES/63/124. undocs.org/fr/A/RES/63/124

_____. 2010. *Le droit de l'homme à l'eau et à l'assainissement*. Résolution adoptée par l'Assemblée générale le 28 juillet 2010. Soixante-quatrième session. A/RES/64/292. undocs.org/pdf?symbol=fr/A/RES/64/292

_____. 2012. *Le droit des aquifères transfrontières*. Résolution adoptée par l'Assemblée générale le 9 décembre 2011. Soixante-sixième session. A/RES/66/104. undocs.org/fr/A/RES/66/104

_____. 2013. *Le droit des aquifères transfrontières*. Résolution adoptée par l'Assemblée générale le 16 décembre 2013. Soixante-huitième session. A/RES/68/118. undocs.org/fr/A/RES/68/118

_____. 2016. *Le droit des aquifères transfrontières*. Résolution adoptée par l'Assemblée générale le 13 décembre 2016. Soixante et onzième session. A/RES/71/150. undocs.org/fr/A/RES/71/150

_____. 2019. *Le droit des aquifères transfrontières.* Résolution adoptée par l'Assemblée générale le 18 décembre 2019. Soixante-quatorzième session. A/RES/74/193. undocs.org/fr/A/RES/74/193

AWS (Alliance for Water Stewardship). 2019. *The AWS International Water Stewardship Standard*, *Version 2.0*. a4ws.org/the-aws-standard-2-0/

Baalbaki R., Ahmad S. H., Kays W., Talhouk S. N., Saliba N. A. et Al-Hindi M. 2019. « Citizen science in Lebanon — a case study for groundwater quality monitoring ». *Royal Society Open Science*, vol. 6, nº 2, art. 181871. doi.org/10.1098/rsos.181871

Bachu S. 2005. « Review of CO_2 storage efficiency in deep saline aquifers ». *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 40, p. 188 à 202. doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.01.007

Bachu S., Bonijoly D., Bradshaw J., Burruss R., Holloway S., Christensen N. P. et Mathiassen O.M. 2007. « CO_2 storage capacity estimation: Methodology and gaps ». *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 1, nº 4, p. 430 à 443. doi.org/10.1016/S1750-5836(07)00086-2

Bahn G.-S. et An B.-C. 2020. « Analysis of environmental purification effect of riparian forest with poplar trees for ecological watershed management: A case study in the floodplain of the Dam Reservoir in Korea ». *Sustainability*, vol. 12, nº 17, art. 6871. doi.org/10.3390/su12176871

Bakhbakhi M. 2006. « Nubian Sandstone Aquifer System ». S. Foster et D. P. Loucks (éds.), *Non-Renewable Groundwater Resources: A Guidebook on Socially-Sustainable Management for Water-Policy Makers*. Paris, UNESCO, p. 75 à 81. en.unesco.kz/non-renewable-groundwater-resources-a-guidebook-on-socially-sustainable-management-for

Banerjee S., Wodon Q., Diallo A., Pushak T., Uddin H., Tsimpo C. et Foster V. 2008. *Access, Affordability and Alternatives: Modern Infrastructure Services in Africa.* Document de référence nº2 de l'Africa Infrastructure Country Diagnostic (AICD). Washington, D.C., Banque mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/12558

Banks D. 2012. *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*. Deuxième édition. Hoboken N.J., John Wiley & Sons, Ltd.

Banque mondiale. 2010. *Deep Wells and Prudence: Towards Pragmatic Action for Addressing Groundwater Overexploitation in India*. Banque mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/2835 Licence : CC BY 3.0 IGO.

_____. 2018a. *Assessment of Groundwater Challenges and Opportunities in Support of Sustainable Development in Sub-Saharan Africa*. Washington, D.C., Banque mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30266

_____. 2018b. *Wastewater: From Waste to Resource — The Case of San Luis Potosí, Mexico.* Washington, D.C., Banque mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/29491

_____. 2019. *Kiribati — Third Phase of Kiribati Adaptation Program Project*. Washington, D.C., Banque mondiale. documents.worldbank.org/curated/en/100741561139747493/Kiribati-Third-Phase-of-Kiribati-Adaptation-Program-Project

_____. 2020. *World Bank Signs Agreement to Improve Groundwater Management in Select States of India*. Communiqué de presse. www.worldbank.org/en/news/press-release/2020/02/17/improving-groundwater-management-india

Beck H. E., Van Dijk A. I. J. M., Miralles D. G., De Jeu R. A. M., Bruijnzeel L. A., McVicar T. R. et Schellekens J. 2013. « Global patterns in base flow index and recession based on streamflow observations from 3394 catchments ». *Water Resources Research*, vol. 49, nº 12, p. 7843 à 7863. doi.org/10.1002/2013WR013918

Berbel J., Borrego-Marin M., Exposito A., Giannoccaro G., Montilla-Lopez N. M. et Roseta-Palma C. 2019. « Analysis of irrigation water tariffs and taxes in Europe ». *Water Policy*, vol. 21, nº 4, p. 806 à 825. doi.org/10.2166/wp.2019.197

Bergkamp G. et Cross K. 2007. « Groundwater and ecosystem services: Towards their sustainable use ». S. Ragone, A. de la Hera, G. Bergkamp, N. Hernández-Mora et J. McKay, *The Global Importance of Groundwater in the 21st Century: Proceedings of the International Symposium on Groundwater Sustainability, January 24-27 2006, Alicante Spain*. Westerville, Ohio, NGWA Press.

Bernat R. F. A., Megdal S. B. et Eden, S. 2020. « Long-term storage credits: Analyzing market-based transactions to achieve Arizona water policy objectives ». *Water*, vol. 12, nº 2, art. 568. doi.org/10.3390/w12020568

Beven K. et Germann P. 2013. « Macropores and water flow in soils revisited ». *Water Resources Research*, vol. 49, nº 6, p. 3071 à 3092. doi.org/10.1002/wrcr.20156

Bexfield L. M., Toccalino P. L., Belitz K., Foreman W. T. et Furlong E. T. 2019. « Hormones and pharmaceuticals in groundwater used as a source of drinking water across the United States ». *Environmental Science and Technology*, vol. 53, nº 6, p. 2950 à 2960. doi.org/10.1021/acs.est.8b05592

BGR/UNESCO (Institut fédéral allemand des géosciences et des ressources naturelles/Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture). 2008. *WHYMAP. Groundwater Resources of the World*. Carte à l'échelle 1:25 000 000. Hanovre/Paris, BGR/UNESCO. www.whymap.org/whymap/EN/Maps_Data/maps_data_node_en.html;jsessionid=66DD893882B11D6409B9BA3C76B2F141.2_cid292

Bhutta M. N. et Smedema L. K. 2007. « One hundred years of waterlogging and salinity control in the Indus valley, Pakistan: A historical review ». *Irrigation and Drainage*, vol. 56, nº S1, p. S81 à S90. doi.org/10.1002/ird.333

Bierkens M. F. P. 2015. « Global hydrology 2015: State, trends, and directions ». *Water Resources Research*, vol. 51, nº 7, p. 4923 à 4947. doi.org/10.1002/2015WR017173

Bierkens M. F. P., Reinhard S., De Bruijn J. A., Veninga W. et Wada Y. 2019. « The shadow price of irrigation water in major groundwater-depleting countries ». *Water Resources Research*, vol. 55, nº 5, p. 4266 à 4287. doi.org/10.1029/2018WR023086

Bierkens M. F. P. et Wada Y. 2019. « Non-renewable groundwater use and groundwater depletion: A review ». *Environmental Research Letters*, vol. 14, nº6, art. 063002. doi.org/10.1088/1748-9326/ab1a5f

Blomquist W., Schlager E. et Heikkila T. 2010. *Common Waters, Diverging Streams: Linking Institutions and Water Management in Arizona, California, and Colorado*. Routledge.

Boisson A., Baïsset M., Alazard M., Perrin J., Villesseche D., Dewandel B., Kloppmann W., Chandra S., Picot-Colbeaux G., Sarah S., Ahmed S. et Maréchal J. C. 2014. « Comparison of surface and groundwater balance approaches in the evaluation of managed aquifer recharge structures: Case of a percolation tank in a crystalline aquifer in India ». *Journal of Hydrology*, vol. 519, partie B, p. 1620 à 1633. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.022

Bonada N., Cañedo-Argüelles M., Gallart F., Von Schiller D., Fortuño P., Latron J., Llorens P., Múrria C., Soria M., Vinyoles D. et Cid N. 2020. « Conservation and management of isolated pools in temporary rivers ». *Water*, vol. 12, nº 10, art. 2870. doi.org/10.3390/w12102870

Boretti A. et Rosa L. 2019. « Reassessing the projections of the World Water Development Report ». *npj Clean Water*, vol. 2, nº 15. doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9

Bouchet L., Thoms M. C. et Parsons M. 2019. « Groundwater as a social-ecological system: A framework for managing groundwater in Pacific Small Island Developing States ». *Groundwater for Sustainable Development*, vol. 8, p. 579 à 589. doi.org/10.1016/j.gsd.2019.02.008

Boulton A. J. et Hancock P. J. 2006. « Rivers as groundwater-dependent ecosystems: A review of degrees of dependency, riverine processes and management implications ». *Australian Journal of Botany*, vol. 54, nº 2, p. 133 à 144. doi.org/10.1071/BT05074

Bradshaw J., Bachu S., Bonijoly D., Burruss R., Holloway S., Christensen N. P. et Mathiassen O. M. 2007. « CO_2 storage capacity estimation: Issues and development of standards ». *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 1, nº 1, p. 62 à 68. doi.org/10.1016/S1750-5836(07)00027-8

Brauer M., Zhao J. T., Bennitt F. B. et Stanaway J. D. 2020. « Global access to handwashing: Implications for COVID-19 control in low-income countries ». *Environmental Health Perspectives*, vol. 128, nº 5. doi.org/10.1289/EHP7200

Bréthaut C., Gallagher L., Dalton J. et Allouche J. 2019. « Power dynamics and integration in the water-energy-food nexus: Learning lessons for transdisciplinary research in Cambodia ». *Environmental Science & Policy*, vol. 94, p. 153 à 162. doi.org/10.1016/j.envsci.2019.01.010

Bretzler A. et Johnson C. A. 2015. « The Geogenic Contamination Handbook: Addressing arsenic and fluoride in drinking water ». *Applied Geochemistry*, vol. 63, p. 642 à 646. doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.08.016

Buffa S., Cozzini M., D'Antoni M., Baratieri M. et Fedrizzi R. 2019. « 5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 104, p. 504 à 522. doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.059

Burchi S. 1999. « National regulations for groundwater: Options, issues and best practices ». S. Salman (éd.), *Groundwater: Legal and Policy Perspectives*. Étude technique de la Banque mondiale nº 456. Washington, D.C., Banque mondiale. elibrary.worldbank.org/doi/abs/10.1596/0-8213-4613-X

_____. 2012. « A comparative review of contemporary water resources legislation: Trends, developments and an agenda for reform ». *Water International*, vol. 37, nº 6, p. 613 à 627. doi.org/10.1080/02508060.2012.694800

_____. 2018a. « Legal principles and legal frameworks related to groundwater ». K. G. Villholth, E. Lopez-Gunn, K. Conti, A. Garrido et J. van der Gun (éds.), *Advances in Groundwater Governance*. Leyde, Pays-Bas, CRC Press/Balkema, p. 119 à 136.

_____. 2018b. « Legal frameworks for the governance of international transboundary aquifers: Pre-and post-ISARM experience ». *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 20, p. 15 à 20. doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.04.007

Burchi S. et Nanni M. 2003. « How groundwater ownership and rights influence groundwater intensive use management ». M. R. Llamas et E. Custodio (éds.), *Intensive Use of Groundwater: Challenges and Opportunities*. Lisse, Pays-Bas, Balkema Publishers, p. 227 à 240.

Butterworth J., Sutton S. et Mekonta L. 2013. « Self-supply as a complementary water services delivery model in Ethiopia ». *Water Alternatives*, vol. 6, nº 3, p. 405 à 423.

Byrne M. P. et O'Gorman P. A. 2015. « The response of precipitation minus evapotranspiration to climate warming: Why the "Wet-get-wetter, dry-get-drier" scaling does not hold over land ». *Journal of Climate*, vol. 28, nº 20, p. 8078 à 8092. doi.org//10.1175/jcli-d-15-0369.1

Campbell C. G., Borglin S. E., Green F. B., Grayson A., Wozei E., Stringfellow W.T. 2006. « Biologically directed environmental monitoring, fate, and transport of estrogenic endocrine disrupting compounds in water: A review ». *Chemosphere*, vol. 65, nº 8, p. 1265 à 1280. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.08.003

Campuzano C., Hansen A. M., De Stefano L., Martinez-Santos P., Torrente D. et Wilaarts B. A. 2014. « Water resources assessment ». B. A. Willaarts, A. Garrido, M. R. Llamas (éds.), *Water for Food and Wellbeing in Latin America and the Caribbean: Social and Environmental Implications for a Globalized Economy*. Oxon, Maryland/New-York, Routledge, p. 27 à 53.

Cantonati M., Stevens L. E., Segadelli S., Springer A. E., Goldscheider N., Celico F., Filippini M., Ogata K. et Gargini A. 2020. « Ecohydrogeology: The interdisciplinary convergence needed to improve the study and stewardship of springs and other groundwater-dependent habitats, biota, and ecosystems ». *Ecological Indicators*, vol. 110, art. 105803. doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105803

Carstens A. J. 2013. *Evaluation of Microbiological and Physico-Chemical Quality of Water from Aquifers in the North West Province, South Africa*. Thèse de Master. Potchefstroom, Afrique du Sud, North-West University. repository.nwu.ac.za/handle/10394/8999

Cashman A. 2014. « Water security and services in the Caribbean ». *Water*, vol. 6, nº 5, p. 1187 à 1203. doi.org/10.3390/w6051187

CBC (Société Radio-Canada). 2016. *Why Nestlé's Aberfoyle Well Matters so much to Guelph, Ont., Residents*. www.cbc.ca/news/canada/kitchener-waterloo/nestle-guelph-rally-nestle-water-aberfoyle-1.3779649

CCNUCC (Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques). 2021. NDC Registry (interim). www4.unfccc.int/sites/NDCStaging/Pages/All.aspx

CDC (Centers for Disease Control and Prevention). n.d. *Industrial Water: Uses in Manufacturing and Industry*. Département de la Santé et des Services sociaux des États-Unis. www.cdc.gov/healthywater/other/industrial/index.html#:~:text=According%20to%20the%20United%20States,%2C%20food%2C%20and%20paper%20products

CDH (Conseil des droits de l'homme). 2010. *Les droits de l'homme et l'accès à l'eau potable et à l'assainissement*. Résolution adoptée par le Conseil des droits de l'homme. A/HRC/RES/15/9. documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/G10/166/34/PDF/G1016634.pdf?OpenElement

_____. 2021. *Droit à un environnement sûr, propre, sain et durable. Résolution adoptée par le Conseil des droits de l'homme.* A/HRC/48/L.23. ap.ohchr.org/documents/dpage_e.aspx?si=A/HRC/48/L.23/Rev.1

CDI (Commission du droit international). 2008. *Projet d'articles sur le droit des aquifères transfrontières*. Organisation des Nations Unies. legal.un.org/ilc/texts/instruments/french/draft_articles/8_5_2008.pdf

CDP (anciennement le Carbon Disclosure Project). 2018. *Treading Water: Corporate Responses to Rising Water Challenges*. Rapport mondial sur l'eau 2018 du CDP. Londres, CDP Worldwide. www.cdp.net/en/research/global-reports/global-water-report-2018

_____. 2020. *The Time to Green Finance.* CDP Financial Services Disclosure Report 2020. Londres, CDP Worldwide. www.cdp.net/en/research/global-reports/financial-services-disclosure-report-2020

_____. 2021. *A Wave of Change: The Role of Companies in Building a Water-Secure World*. Rapport mondial sur les ressources en eau 2020 du CDP. Londres, CDP Worldwide. www.cdp.net/en/research/global-reports/global-water-report-2020

_____. Non publié. Données de 2021 obtenues auprès de Cate Lamb (Directrice mondiale de la sécurité de l'eau au CDP et responsable des Champions de haut niveau pour l'action climatique de la COP26 de la CCNUCC — Eau) et Laureen Missaire (CDP, Chargée de projet principale, Sécurité de l'eau).

CEE-ONU (Commission économique des Nations Unies pour l'Europe). 1992. *Convention sur la protection et l'utilisation des cours d'eau transfrontières et des lacs internationaux*. Helsinki, 17 mars 1992, CEE-ONU. treaties.un.org/doc/Treaties/1992/03/19920317%2005-46%20AM/Ch_XXVII_05p.pdf

_____. 2007. *Our Waters: Joining Hands across Borders. First Assessment of Transboundary Rivers, Lakes and Groundwaters*. New York/Genève, Organisation des Nations Unies. unece.org/DAM/env/water/blanks/assessment/assessmentweb_full.pdf

_____. 2011. *Second Assessment of Transboundary Rivers, Lakes and Groundwaters*. New York/Genève, Organisation des Nations Unies. unece.org/DAM/env/water/publications/assessment/English/ECE_Second_Assessment_En.pdf

_____. 2013. *Guide pour l'application de la Convention sur l'eau*. New York/Genève, Organisation des Nations Unies. unece.org/DAM/env/water/publications/WAT_Guide_to_implementing_Convention/ECE_MP.WAT_39_FRE_pdf_web.pdf

_____. 2014. *Dispositions Types sur les eaux souterraines transfrontières*. New York/Genève, Organisation des Nations Unies. unece.org/DAM/env/water/publications/WAT_model_provisions/ECE_MP.WAT_40_FR_for_web.pdf

_____. 2015. *Note d'orientation sur les avantages de la coopération dans le domaine des eaux transfrontières : Identification, évaluation et communication*. New York/Genève, Organisation des Nations Unies. unece.org/DAM/env/water/publications/2015/ECE_MP.WAT_47_Policy_Guidance_Benefits_Cooperation_Fr_light.pdf

CEE-ONU, Équipe spéciale de la surveillance et de l'évaluation. 2000. Lignes directrices sur la surveillance et l'évaluation des eaux souterraines transfrontières. Lelystad, Pays-Bas. unece.org/fileadmin/DAM/env/water/activities/Monitoring_Assessment/guidelinesgroundwater_FRE_forReview_clean_pic.pdf

CEE-ONU/OMS. 2019. Rapport régional sur l'état d'avancement de l'application du Protocole. Réunion des Parties du Protocole sur l'eau et la santé. ECE/MP.WH/2019/4–EUPCR/1814149/1.2/2019/MOP-5/10. unece.org/environment-policy/water/areas-work-protocol/improving-governance-water-and-health/fourth-reporting-exercise-under-protocol-water-and-health

CEE-ONU/UNESCO. 2021. *Progrès de la coopération dans le domaine des eaux transfrontières : situation mondiale de l'indicateur 6.5.2 des ODD et besoins d'accélération*. Paris, UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380284

Celia M. A. 2017. « Geological storage of captured carbon dioxide as a large-scale carbon mitigation option ». *Water Resources Research*, vol. 53, nº 5, p. 3527 à 3533. doi.org//10.1002/2017WR020841

CESAO (Commission économique et sociale pour l'Asie occidentale). 2015. *Water Development Report 6: The Water, Energy and Food Security Nexus in the Arab Region*. Beyrouth, Organisation des Nations Unies. www.unescwa.org/publications/escwa-water-development-report-6-water-energy-and-food-security-nexus-arab-region

_____. 2019. *Moving towards Water Security in the Arab Region*. Beyrouth, Organisation des Nations Unies. archive.unescwa.org/publications/moving-towards-achieving-water-security-arab-region

_____. À paraître. *Water Development Report 9: Groundwater in the Arab Region*.

CESAO/BGR (Commission économique et sociale pour l'Asie occidentale/Institut fédéral allemand des géosciences et des ressources naturelles). 2013. *Inventory of Shared Water Resources in Western Asia*. Beyrouth, Organisation des Nations Unies. waterinventory.org/

CESCR (Comité des droits économiques, sociaux et culturels). 2002. *Observation générale nº 15 : Le droit à l'eau (art. 11 et 12 du Pacte international relatif aux droits économiques, sociaux et culturels).* Vingt-neuvième session, Genève, 11-29 novembre 2002. digitallibrary.un.org/record/486454

GCRAI WLE (Programme de recherche sur l'eau, la terre et les écosystèmes du Groupe consultatif international pour la recherche agricole). 2015. *Groundwater and ecosystem services: A Framework for Managing Smallholder Groundwater-Dependent Agrarian Socio-Ecologies — Applying an Ecosystem Services and Resilience Approach*. Colombo, IWMI (Institut international de gestion des ressources en eau). doi.org/10.5337/2015.208

Chadwick R. A., Williams G. A., Williams J. D. O. et Noy D. J. 2012. « Measuring pressure performance of a large saline aquifer during industrial-scale CO_2 injection: The Utsira Sand, Norwegian North Sea » *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 10, p. 374 à 388. doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.06.022

Chaves E. 2019. *Report on the Groundwater Conditions of Grand Bahama after Hurricane Dorian and Proposed Mitigation Measures.*

Chen J., Tang C., Sakura Y., Yu J. et Fukushima Y. 2005. « Nitrate pollution from agriculture in different hydrogeological zones of the regional groundwater flow system in the North China Plain ». *Hydrogeology Journal*, vol. 13, nº 3, p. 481 à 492. doi.org/10.1007/s10040-004-0321-9

China Water Risk. 2015. *New 'Water Ten Plan' to Safeguard China's Waters*. 16 avril 2015. www.chinawaterrisk.org/notices/new-water-ten-plan-to-safeguard-chinas-waters/

Clarke C. J., George R. J., Bell R. W. et Hatton T. J. 2002. « Dryland salinity in south-western Australia: Its origins, remedies, and future research directions ». *Soil Research*, vol. 40, nº 1, p. 93 à 113. doi.org/10.1071/SR01028

Cleaver C., Franks T., Boesten J. et Kiire A. 2005. *Water Governance and Poverty: What Works for the Poor*. Bradford, Royaume-Uni, Bradford Centre for International Development.

Closas A. et Molle F. 2016. *Groundwater Governance in Europe*. Rapport de projet Nº 3 de l'IWMI, Colombo, IWMI (Institut international de gestion des ressources en eau). gw-mena.iwmi.org/wp-content/uploads/sites/3/2017/04/Rep.3-Groundwater-governance-in-Europe_final_cover.pdf

Closas A. et Rap E. 2017. « Solar-based groundwater pumping for irrigation: Sustainability, policies and limitations » *Energy Policy*, vol. 104, p. 33 à 37. doi.org/10.1016/j.enpol.2017.01.035

Closas A. et Villholth K. G. 2016. *Aquifer Contracts: A Means to Solving Groundwater Over-Exploitation in Morocco?* GRIPP Case Profile Series No. 1. Colombo, Institut international de gestion des ressources en eau (IWMI). gripp.iwmi.org/gripp/publications/case-profile-series/issue-01.pdf

CME (Conseil mondial de l'eau). 2018. *Ten Actions for Financing Water Infrastructure.* Rapport du Conseil mondial de l'eau Marseille, France, CME. www.worldwatercouncil.org/en/publications/ten-actions-financing-water-infrastructure

Cobbing J. 2020. « Groundwater and the discourse of shortage in Sub-Saharan Africa ». *Hydrogeology Journal*, vol. 28, p. 1143 à 1154. doi.org/10.1007/s10040-020-02147-5

Cobbing J. et Hiller B. 2019. « Waking a sleeping giant: Realizing the potential of groundwater in Sub-Saharan Africa ». *World Development*, vol. 122, p. 597 à 613. doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.06.024

CoCT (Ville du Cap). 2019. *Our Shared Water Future: Cape Town's Water Strategy*. Ville du Cap. resource.capetown.gov.za/documentcentre/Documents/City%20strategies,%20plans%20and%20frameworks/Cape%20Town%20Water%20Strategy.pdf

Commission européenne. 2008. *Protection des eaux souterraines en Europe. La nouvelle directive sur les eaux souterraines : une consolidation du cadre réglementaire de l'UE*. Luxembourg, Office des publications de l'Union européenne. op.europa.eu/fr/publication-detail/-/publication/4f3c68f2-464d-4502-9086-6fcd1be8ab01

_____. 2011. *Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC). Technical Report on Groundwater Dependent Terrestrial Ecosystems.* Rapport technique nº 6. Union européenne.

_____. 2014a. *Directive-cadre européenne sur l'eau (2000/60/EC). Technical Report on Methodologies Used for Assessing Groundwater Dependent Terrestrial Ecosystems*. Rapport technique nº 8. Union européenne. circabc.europa.eu/sd/a/1448ec4b-a1e0-4627-856e-d21e5dbbb4db/Technical_report_No8_methodologies_used_assessing_GWDTEs.pdf

_____. 2014b. Directive 2014/80/UE de la Commission européenne du 20 juin 2014 modifiant l'annexe II de la directive 2006/118/CE du Parlement européen et du Conseil européen sur la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration. *Journal officiel de l'Union européenne*, L. 182/52. data.europa.eu/eli/dir/2014/80/oj

_____. 2015. *Technical Report on Groundwater Associated Aquatic Ecosystems.* Rapport technique nº 9. Union européenne. circabc.europa.eu/sd/a/9e261309-369a-405f-8713-082a128b503b/GWAAE_final_Published_Report.pdf

Conférence internationale sur l'eau et l'environnement (ICWE). 1992. *Déclaration de Dublin sur l'eau dans la perspective d'un développement durable*. Dublin, 31 janvier 1992, ICWE. www.ircwash.org/sites/default/files/71-ICWE92-13393.pdf

Conseil international des mines et des métaux (ICMM). 2012. *Water Management in Mining: A Selection of Case Studies*. Londres, ICMM. icmm.uat.byng.uk.net/en-gb/publications/water/water-management-in-mining-a-selection-of-case-studies

Coulibaly L., Jakus P. M. et Keith J. E. 2014. « Modeling water demand when households have multiple sources of water ». *Water Resources Research*, vol. 50, nº 7, p. 6002 à 6014. doi.org/10.1002/2013WR015090

Coyte R. M., Jain R. C., Srivastava S. K., Sharma K. C., Khalil A., Ma L. et Vengosh A. 2018. « Large-scale uranium contamination of groundwater resources in India ». *Environmental Science & Technology Letters*, vol. 5, nº 6, p. 341 à 347. doi.org/10.1021/acs.estlett.8b00215

Coyte R. M., Singh A., Furst K. E., Mitch W. A. et Vengosh A. 2019. « Co-occurrence of geogenic and anthropogenic contaminants in groundwater from Rajasthan, India ». *Science of The Total Environment*, vol. 688, p. 1216 à 1227. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.334

Crosbie R. S., McCallum J. L., Walker G. R. et Chiew F. H. S. 2012. « Episodic recharge and climate change in the Murray-Darling Basin, Australia ». *Hydrogeology Journal*, vol. 20, p. 245 à 261. doi.org/10.1007/s10040-011-0804-4

Cuthbert M. O., Ackworth R. I., Andersen M. S., Larsen J. R., McCallum A. M., Rau G. C. et Tellam J. H. 2016. « Understanding and quantifying focused, indirect groundwater recharge from ephemeral streams using water table fluctuations ». *Water Resources Research*, vol. 52, nº 2, p. 827 à 840. doi.org/10.1002/2015WR017503

Cuthbert M. O., Taylor R. G., Favreau G., Todd M. C., Shamsudduha M., Villholth K. G., MacDonald A. M., Scanlon B. R., Kotchoni D. O. V., Vouillamoz J.-M., Lawson F. M. A., Adjomayi P. A., Kashaigili J., Seddon D., Sorensen J. P. R., Ebrahim G. Y., Owor M., Nyenje P. M., Nazoumou Y., Goni I., Ousmane B. I., Sibanda T., Ascott M. J., Macdonald D. M. J., Agyekum W., Koussoubé Y., Wanke H., Kim H., Wada Y., Lo M.-H., Oki T. et Kukuric N. 2019a. « Observed controls on resilience of groundwater to climate variability in sub-Saharan Africa ». *Nature, vol.* 572, p. 230 à 234. doi.org/10.1038/s41586-019-1441-7

Cuthbert M. O., Gleeson T., Moosdorf N., Befus K. M., Schneider A., Hartmann J. et Lehner B. 2019b. « Global patterns and dynamics of climate-groundwater interactions ». *Nature Climate Change*, vol. 9, p. 137 à 141. doi.org/10.1038/s41558-018-0386-4

D

Dalin C., Wada Y., Kastner T. et Puma M. J. 2017. « Groundwater depletion embedded in international food trade ». *Nature*, vol. 543, p. 700 à 704. doi.org/10.1038/nature21403

Danert K., Adekile D. et Gesti Canuto J. 2020. « Striving for borehole drilling professionalism in Africa: A review of a 16-year initiative through the rural water supply network from 2004 to 2020 ». *Water*, vol. 12, nº 12, art. 3305. doi.org/10.3390/w12123305

Danert K. et Healy A. 2021. « Monitoring groundwater use as a domestic water source by urban households: Analysis of data from Lagos State, Nigeria and Sub-Saharan Africa with implications for policy and practice ». *Water*, vol. 13, nº 4, art. 568. doi.org/10.3390/w13040568

Dangendorf S., Marcos M., Wöppelmann G., Conrad C. P., Frederikse T. et Riva R. 2017. « Reassessment of 20th century global mean sea level rise ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 114, nº 23, p. 5946 à 5951. doi.org/10.1073/pnas.1616007114

Danielopol D. L., Griebler C., Gunatilaka A. et Notenboom J. 2003. « Present state and future prospects for groundwater ecosystems ». *Environmental Conservation*, vol. 30, nº 2, p. 104 à 130. doi.org/10.1017/S0376892903000109

Dashora Y., Dillon P., Maheshwari B., Soni P., Dashora R., Davande S., Purohit R. C. et Mittal H. K. 2018. « A simple method using farmers' measurements applied to estimate check dam recharge in Rajasthan, India ». *Sustainable Water Resources Management*, vol. 4, nº 2, p. 301 à 316. doi.org/10.1007/s40899-017-0185-5

Dawoud M. A. 2019. *Sustainable Brackish Groundwater Policy in the Arab Region*. Note d'orientation, Conseil arabe de l'eau et Bureau de l'UNESCO au Caire.

De Graaf I. E. M., Gleeson T., (Rens) van Beek L. P. H., Sutanudjaja E. H. et Bierkens M. F. P. 2019. « Environmental flow limits to global groundwater pumping ». *Nature*, vol. 574, p. 90 à 94. doi.org/10.1038/s41586-019-1594-4

De Magny G. C., Thiaw W., Kumar V., Manga N. M., Diop B. M., Gueye L., Kamara M., Roche B., Murtugudde R. et Colwell R. R. 2012. « Cholera outbreak in Senegal in 2005: Was climate a factor? » *PLoS One*, vol. 7, nº 8, e44577. doi.org/10.1371/journal.pone.0044577

De Sousa T. et Berrocal Capdevila, E. 2019. *What's in a Name? Deconstructing and Defining Public Policy*. État de Nouvelle-Galles du Sud, Australie, 17 avril 2019. www.digital.nsw.gov.au/transformation/policy-lab/what-policy

Deb Roy A. et Shah T. 2003. « Socio-ecology of groundwater irrigation in India ». R. Llamas et E. Custodio (éds.), *Intensive Use of Groundwater: Challenges and Opportunities*. Lisse, Pays-Bas, Swets and Zeitlinger Publishers, p. 307 à 336.

Département de l'énergie des États-Unis. 2016. *Potential Vulnerability of US Petroleum Refineries to Increasing Water Temperature and/or Reduced Water Availability*. Résumé du Rapport final. www.energy.gov/sites/prod/files/2016/03/f30/US%20DOE%20Refinery%20Water%20Study.pdf

Département des ressources en eau de Californie. 2014. *Sustainable Groundwater Management Act* (loi sur la gestion durable des eaux souterraines) consistant en un ensemble de trois projets de loi dont AB 1739 (Dickinson), SB 1168 (Pavley) et SB 1319 (Pavley), et les règlementations ultérieures à l'échelle de l'État. Tel qu'appliqué au 1er janvier 2019. www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/gmp/docs/sgma/sgma_20190101.pdf

DESA (Département des affaires économiques et sociales de l'Organisation des Nations Unies). 2020. *Perspectives de la population mondiale 2019 : principaux résultats*. population.un.org/wpp/

_____. n.d. *Les 17 objectifs*. Département des affaires économiques et sociales, Développement durable. sdgs.un.org/fr/goals

Dickens C., Rebelo L.-M. et Nhamo L. 2017. *Guidelines and Indicators for Target 6.6 of the SDGs: Change in the Extent of Water-Related Ecosystems over Time*. Rapport de l'Institut international de gestion des ressources en eau (IWMI). Programme de recherche sur l'eau, la terre et les écosystèmes (WLE) du CGIAR. www.iwmi.cgiar.org/Publications/wle/reports/guideline_and_indicators_for_target_6-6_of_the_sdgs-5.pdf

Dierauer J. R., Whitfield P. H. et Allen D. M. 2018. « Climate controls on runoff and low flows in mountain catchments of Western North America ». *Water Resources Research*, vol. 54, nº 10, p. 7495 à 7510. doi.org/10.1029/2018WR023087

Dieter C. A., Maupin M. A., Caldwell R. R., Harris M. A., Ivahnenko T. I., Lovelace J. K., Barber N. L. et Linsey K. S. 2018. *Estimated Use of water in the United States in 2015*. Circulaire 1441 du Service géologique des États-Unis. Reston, Virginie, États-Unis d'Amérique. Service géologique des États-Unis (USGS). doi.org/10.3133/cir144

Dillon P., Stuyfzand P., Grischek T., Lluria M., Pyne R. D. G., Jain R. C., Bear J., Schwarz J., Wang W., Fernandez E., Stefan C., Pettenati M., Van der Gun J., Sprenger C., Massmann G., Scanlon B. R., Xanke J., Jokela P., Zheng Y., Rossetto R., Shamrukh M., Pavelic P., Murray E., Ross A., Bonilla Valverde J. P., Palma Nava A., Ansems N., Posavec K., Ha K., Martin R. et Sapiano M. 2019. « Sixty years of global progress in managed aquifer recharge ». *Hydrogeology Journal, v*ol. 27, p. 1 à 30. doi.org/10.1007/s10040-018-1841-z

Dixon-Jain P., Norman R., Stewart G., Fontaine K., Walker K., Sundaram B., Flannery E., Riddell A. et Wallace L. 2014. *Pacific Island Groundwater and Future Climates: First-Pass Regional Vulnerability Assessment.* Record 2014/043. Canberra, Geoscience Australia. doi.org/10.11636/Record.2014.043

Dodds W. K., Bouska W. W., Eitzmann J. L., Pilger T. J., Pitts K. L., Riley A. J., Schloesser J. T. et Thornbrugh D. J. 2009. « Eutrophication of U.S. Freshwaters: Analysis of potential economic damages ». *Environmental Science and Technology*, vol. 43, nº 1, p. 12 à 19. doi.org/10.1021/es801217q

Döll P., Hoffmann-Dobrev H., Portmann F. T., Siebert S., Eicker A., Rodell M., Strassberg G. et Scanlon B. R. 2012. « Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variations ». *Journal of Geodynamics*, vol. 59 à 60, p. 143 à 156. doi.org/10.1016/j.jog.2011.05.001

Döll P., Schmied H. M., Schuh C., Portmann F. T. et Eicker A. 2014. « Global-scale assessment of groundwater depletion and related groundwater abstractions: Combining hydrological modeling with information from well observations and GRACE satellites ». *Water Resources Research*, vol. 50, nº 7, p. 5698 à 5720. doi.org/10.1002/2014WR015595

Doody T. M., Barron O. V., Dowsley K., Emelyanova I., Fawcett J., Overton I. C., Pritchard J. L., Van Dijk A. I. J. M. et Warren G. 2017. « Continental mapping of groundwater dependent ecosystems: A methodological framework to integrate diverse data and expert opinion ». *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 10, p. 61 à 81. doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.01.003

Driscoll J. P. et Middlemis H. 2011. *Geothermal Water Use: Requirements and Potential Effects*. Conférence australienne sur l'énergie géothermique de 2011, p. 63 à 67.

Duker A., Cambaza C., Saveca P., Ponguane S., Mawoyo T. A., Hulshof M., Nkomo L., Hussey S., Van den Pol B., Vuik R., Stigter T. et Van der Zaag P. 2020. « Using nature-based water storage for smallholder irrigated agriculture in African drylands: Lessons from frugal innovation pilots in Mozambique and Zimbabwe ». *Environmental Science and Policy*, vol. 107, p. 1 à 6. doi.org/10.1016/j.envsci.2020.02.010

Dutch ATES. 2016. *Dutch Policy on ATES Systems*. dutch-ates.com/wp-content/uploads/2016/09/DutchPolicyOnATESSystems092016.pdf

Eamus D., Zolfaghar S., Villalobos-Vega R., Cleverly J. et Huete A. 2015. « Groundwater-dependent ecosystems: Recent insights from satellite and field-based studies ». *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 19, nº 10, p. 4229 à 4256. doi.org/10.5194/hess-19-4229-2015

Eckstein G. 2013. « Rethinking transboundary ground water resources management: A local approach along the Mexico-U.S. Border ». *The Georgetown International Environmental Law*, vol. 25, nº 1, p. 95 à 128.

_____. 2017. *The International Law of Transboundary Groundwater Resources*. Londres, Routledge.

Efficiency for Access. 2019. *Solar Water Pump Outlook 2019: Global Trends and Market Opportunities*. Rapport préparé par CLASP/Energy Saving Trust/Dalberg. efficiencyforaccess.org/publications/solar-water-pump-outlook-2019-global-trends-and-market-opportunities

EIP (Environmental Integrity Project). 2019. *Coal's Poisonous Legacy: Groundwater Contaminated by Coal Ash across the U.S.* environmentalintegrity.org/reports/coals-poisonous-legacy/

Ellis E. C. et Ramankutty N. 2008. « Putting people in the map: Anthropogenic biomes of the world ». *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 6, nº 8, p. 439 à 447. doi.org/10.1890/070062

Ellison D., Morris C. E., Locatelli B., Sheil D., Cohen J., Murdiyarso D., Gutierrez V., Van Noordwijk M., Creed I. F., Pokorny J., Gaveau D., Spracklen D. V., Bargués Tobella A., Ilstedt U., Teuling A. J., Gebreyohannis Gebrehiwot S., Sands D. C., Muys B., Verbist B., Springgay E., Sugandi Y. et Sullivan C. A. 2017. « Trees, forests and water: Cool insights for a hot world ». *Global Environmental Change*, vol. 43, p. 51 à 61. doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002

English P. W. 1968. « The origin and spread of qanats in the Old World ». *Proceedings of the American Philosophical Society*, vol. 112, nº 3, p. 170 à 181.

Erwin K. L. 2009. « Wetlands and global climate change: The role of wetland restoration in a changing world ». *Wetlands Ecology and Management*, vol. 17, p. 71 à 84. doi.org/10.1007/s11273-008-9119-1

Espindola I. B., Telarolli Almeida de Leite M. L. et Ribeiro W. C. 2020. « South-American transboundary waters: The management of the Guarani aquifer system and the La Plata basin towards the future ». R. C. Brears (éd.), *The Palgrave Handbook of Climate Resilient Societies*. Cham, Suisse, Palgrave Macmillan, p. 1 à 35. doi.org/10.1007/978-3-030-32811-5_51-1

Eurostat. n.d. Base de données en ligne de la Commission européenne. ec.europa.eu/eurostat/data/database (consulté entre avril et octobre 2021)

EUWI+ (Initiative de l'Union européenne pour l'eau relative aux pays du Partenariat oriental). 2020. *Development of Draft River Basin Management Plan for Alazani-Iori River Basin in Georgia*. Rapport ENI/2016/372-403 de EUWI+. Version 1.1, mars 2020. Vienne/Paris, Umweltbundesamt GmbH/Office international de l'eau (OiEau). www.eiec.gov.ge/getattachment/b4585a39-30e5-4ac4-9fb7-1fcc204052f4/Thematic_Summary_Alazani-Iori-river-basin_ENG.pdf.aspx

Evans R. S. et Dillon P. 2018. « Linking groundwater and surface water: Conjunctive water management ». K. G. Villholth, E. Lopez-Gunn, K. Conti, A. Garrido et J. van der Gun (éds.), *Advances in Groundwater Governance*. Leyde, Pays-Bas, CRC Press, Taylor & Francis Group/Balkema, p. 329 à 351.

F

Facts & Factors. 2020. *Bottled Water Market By Type (Still Bottled Water, Carbonated Bottled Water, Flavoured Bottled Water, and Functional Bottled Water) and By End-Use (Packaging, Consumer Goods, and Agriculture): Global Industry Outlook, Market Size, Business Intelligence, Consumer Preferences, Statistical Surveys, Comprehensive Analysis, Historical Developments, Current Trends, and Forecasts, 2020-2026*. www.fnfresearch.com/bottled-water-market-by-type-still-bottled-water-713

Famiglietti, J. S. 2014. « The global groundwater crisis ». *Nature Climate Change*, vol. 4, p. 945 à 948. doi.org/10.1038/nclimate2425

Fan Y., Li H. et Miguez-Macho G. 2013. « Global patterns of groundwater table depth ». *Science*, vol. 339, nº 6122, p. 940 à 943. doi.org/10.1126/science.1229881

Fan Y., Miguez-Macho G., Jobbágy E. G., Jackson R. B. et Otero-Casal C. 2017. « Hydrologic regulation of plant rooting depth ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, vol.* 114, nº 40, p. 10572 à 10577. doi.org/10.1073/pnas.1712381114

FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture). 2012. *Directives volontaires pour une Gouvernance responsable des régimes fonciers applicables aux terres, aux pêches et aux forêts dans le contexte de la sécurité alimentaire nationale*. Rome, FAO. www.fao.org/tenure/voluntary-guidelines/fr/

_____. 2013. *Guidelines to Control Water Pollution from Agriculture in China: Decoupling Water Pollution from Agricultural Production*. FAO Water Reports No. 40. Rome, FAO. www.fao.org/3/i3536e/i3536e.pdf

_____. 2017. L'Avenir de l'alimentation et de l'agriculture : Tendances et défis. Rome, FAO. www.fao.org/global-perspectives-studies/resources/detail/fr/c/1169817/

_____. 2018a. *More People, More Food, Worse Water? A Global Review of Water Pollution from Agriculture*. Rome/Colombo, FAO/Institut international de gestion des ressources en eau (IWMI). www.fao.org/3/CA0146EN/ca0146en.pdf

_____. 2018b. *The Benefits and Risks of Solar-Powered Irrigation — A Global Overview*. Rome, FAO. www.fao.org/3/I9047EN/i9047en.pdf

_____. 2019. *Comment inclure les besoins environnementaux en eaux dans l'indicateur 6.4.2 du « stress hydrique » : directives pour une méthode standard minimale pour le rapport mondial*. Rome, FAO. www.fao.org/publications/card/en/c/CA3097FR

_____. 2020. *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2020 : relever le défi de l'eau dans l'agriculture*. Rome, FAO. doi.org/10.4060/cb1447fr

_____. 2021. *L'état des ressources en terres et en eau pour l'alimentation et l'agriculture dans le monde : des systèmes au bord de la rupture*. Rapport de synthèse 2021. Rome, FAO. doi.org/10.4060/cb7654fr

FAOSTAT. n.d. *Données de l'alimentation et de l'agriculture.* FAO, Rome. www.fao.org/faostat/fr/#home (consulté le 5 octobre 2021)

Favreau G., Cappelaere B., Massuel S., Leblanc M., Boucher M., Boulain N. et Leduc C. 2009. « Land clearing, climate variability, and water resources increase in semiarid southwest Niger: A review ». *Water Resources Research*, vol. 45, nº 7, art. W00A16. doi.org/10.1029/2007WR006785

Ferguson G. et Gleeson T. 2012. « Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change ». *Nature Climate Change*, vol. 2, p. 342 à 345. doi.org/10.1038/nclimate1413

Ferguson G., Cuthbert M. O., Befus K., Gleeson T. et McIntosh J. C. 2020. « Rethinking groundwater age ». *Nature Geoscience*, vol. 13, nº 9, p. 592 à 594. doi.org/10.1038/s41561-020-0629-7

Ferguson G., McIntosh J.C., Warr O., Sherwood Lollar B., Ballentine C.J., Famiglietti J.S., Kim J-H., Michalski J.R., Mustard J.F., Tarnasad J. et MacDonnell J.J. 2021. « Crustal groundwater volumes greater than previously thought ». *Geophysical Research Letters*, vol. 48, nº 16, art. e2021GL093549. doi.org/10.1029/2021GL093549

Ferrero G., Setty K., Rickert B., George S., Rinehold A., DeFrance J. et Bartram J. 2019. « Capacity building and training approaches for water safety plans: A comprehensive literature review ». *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, vol. 222, nº 4, p. 615 à 627. doi.org/10.1016/j.ijheh.2019.01.011

Finley R. J. 2014. « An overview of the Illinois Basin — Decatur Project ». *Greenhouse Gases: Science and Technology*, vol. 4, nº 5, p. 571 à 579. doi.org/10.1002/ghg.1433

Foster S. 2020. « Global policy overview of groundwater in urban development — A tale of 10 cities! » *Water*, vol. 12, nº 2, art. 456. doi.org/10.3390/w12020456

Foster S. et Chilton J. 2003. « Groundwater: The processes and global significance of aquifer degradation ». *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, vol. 358, nº 1440, p. 1957 à 1972. doi.org/10.1098/rstb.2003.1380

_____. 2018. « Groundwater management: Policy principles & planning practices ». K.G. Villholth, E. Lopez-Gunn, K. Conti, A. Garrido et J. van der Gun (éds.), *Advances in groundwater governance*. Leyde, Pays-Bas, CRC Press/Balkema, p. 73 à 95.

Foster S. et Garduño H. 2009. « Gestión apropiada del recurso hídrico subterráneo en América Latina. Lecciones de experiencias internacionales » [Gestion appropriée des eaux souterraines en Amérique latine. Leçons tirées de l'expérience internationale]. *Revista Aqua-LAC*, vol. 1, nº 1. Doi.org/10.29104/phi-aqualac/2009-v1-1-01 (en espagnol)

Foster S. et Hirata R. 2012. « Groundwater use for urban development: Enhancing benefits and reducing risks. *On the Water Front*, vol. 3, p. 21 à 29.

Foster S. et Loucks D. P. (éds.). 2006. *Non-Renewable Groundwater Resources: A Guidebook on Socially-Sustainable Management for Water-Policy Makers*. Paris, UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000146997?posInSet=1&queryId=4b3dd499-0696-45d2-9f10-9feda13c7d4f

Foster S. et Shah T. 2012. *Groundwater Resources and Irrigated Agriculture — Making a Beneficial Relation more Sustainable*. Article de mise en perspective, GWP. Stockholm, Partenariat mondial pour l'eau. www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/publications/perspective-papers/04-groundwater-resources-and-irrigated-agriculture-2012.pdf

Foster S., Koundouri P., Tuinhof A., Kemper K., Nanni M. et Garduño H. 2006. *Groundwater Dependent Ecosystems: The Challenge of Balanced Assessment and Adequate Conservation*. GW-MATE Briefing Note Series No. 15. Washington, D.C., Groupe de la Banque mondiale. documents.worldbank.org/curated/en/717061468155365572/Groundwater-dependent-ecosystems-the-challenge-of-balanced-assessment-and-adequate-conservation

Foster S., Chilton J., Moench M., Cardy F. et Schiffler M. 2008. *Groundwater in Rural Development: Facing the Challenges of Supply and Resource Sustainabili*ty. Water P-Notes No. 19. Washington D.C., Banque mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/11749

Foster S., Van Steenbergen F., Zuleta J. et Garduño H. 2010a. *Conjunctive Use of Groundwater and Surface Water: From Spontaneous Coping Strategy to Adaptive Resource Management*. GW-MATE Strategic Overview Series No. 2. Washington, D.C., Groupe de la Banque mondiale. documents.worldbank.org/curated/en/874731468315319173/Conjunctive-use-of-groundwater-and-surface-water-from-spontaneous-coping-strategy-to-adaptive-resource-management

Foster S., Hirata R. et Garduño H. 2010b. *Urban Groundwater Use Policy — Balancing the Benefits and Risks in Developing Nations*. GW-MATE Strategic Overview Series No. 3. Washington, D.C., Groupe de la Banque mondiale.

Foster S., Garduño H., Tuinhof A. et Tovey C. 2010c. *Groundwater Governance: Conceptual Framework for Assessment of Provisions and Needs*. GW-MATE Strategic Overview Series No. 1. Washington, D.C., Banque mondiale. documents.worldbank.org/curated/en/603871468323116801/Groundwater-governance-conceptual-framework-for-assessment-of-provisions-and-needs

Foster S., Tuinhof A. et Van Steenbergen F. 2012. « Managed groundwater development for water-supply security in Sub-Saharan Africa: Investment priorities ». *Water SA*, vol. 38, nº 3, p. 359 à 366. doi.org/10.4314/wsa.v38i3.1

Foster S., Evans R. et Escolero O. 2015. « The groundwater management plan: In praise of a neglected 'tool of our trade ». *Hydrogeology Journal*, vol. 23, nº 5, p. 847 à 850. doi.org/10.1007/s10040-015-1261-2

Foster S., Bousquet A. et Furey S. 2018. « Urban groundwater use in tropical Africa — a key factor in enhancing water security? » *Water Policy*, vol. 20, nº 5, p. 982 à 994. doi.org/10.2166/wp.2018.056

Foster S., Gathu J., Eichholz M. et Hirata R. 2020a. « Climate change: The utility groundwater role in supply security ». *The Source*, avril 2020, p. 50 à 54. www.thesourcemagazine.org/climate-change-the-utility-groundwater-role-in-supply-security/

Foster S., Mielby S., Hirata R., Tubic A. et Gathu J. 2020b. « Groundwater quality management for urban supply security ». *The Source*, juillet 2020, p. 45 à 49. www.thesourcemagazine.org/groundwater-quality-management-for-urban-supply-security/

Foster S., Eichholz M., Nlend B. et Gathu J. 2020c. « Securing the critical role of groundwater for the resilient water-supply of urban Africa ». *Water Policy*, vol. 22, nº 1, p. 121 à 132. doi.org/10.2166/wp.2020.177

Fraser C. M., Kalin R. M., Rivett M. O., Nkhata M. et Kanjaye M. 2018. « A national approach to systematic transboundary aquifer assessment and conceptualisation at relevant scales: A Malawi case study ». *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 20. p. 35 à 48. doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.04.001

Fraser C. M., Kalin R., Nkhata M. et Kanjaye M. 2020. « A national border-based assessment of Malawi's transboundary aquifer units: Towards achieving Sustainable Development Goal 6.5.2 ». *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 31, art. 100726. doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100726

Frątczak, W., Michalska-Hejdu, D., Zalewski M. et Izydorczyk K. 2019. « Effective phosphorous reduction by a riparian plant buffer zone enhanced with a limestone-based barrier ». *Ecological Engineering*, vol. 130, p. 94 à 100. doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.01.015

Freeze R. A. et Cherry J. A. 1979. *Groundwater*. Englewood Cliffs, NewJersey, Prentice-Hall Inc.

Fridleifsson I. B., Bertani R., Huenges E., Lund J. W., Ragnarsson A.et Rybach L. 2008. « The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change ». *Proceedings of the IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources*. Présenté lors de la Réunion du GIEC sur les sources d'énergie renouvelables, Lübeck., Allemagne, p. 59 à 80. www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/proc-renewables-lubeck.pdf

G

Gage A. et Milman A. 2020. « Groundwater plans in the United States: Regulatory frameworks and management goals ». *Groundwater*, vol. 59, nº 2, p. 175 à 189. doi.org/10.1111/gwat.13050

García G. D. H. 2015. *Sub componente II.3, Aguas subterráneas para el ADT: Caracterización y diagnóstico transfronterizo relacionado a las aguas subterráneas de la cuenca del Plata* [Sous-composante II.3, Eaux souterraines dans le cadre de l'analyse diagnostique transfrontière : Caractérisation et diagnostic des eaux souterraines dans le bassin du Río de la Plata]. cicplata.org/wp-content/uploads/2019/08/Agua-subterr%C3%A1nea_Garc%C3%ADa-Segredo.pdf (en espagnol)

Garduño H. et Foster S. 2010. *Sustainable Groundwater Irrigation: Approaches to Reconciling Demand with Resources*. GW-MATE Strategic Overview Series No. 4. Washington, D.C., Banque mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/27818

Gaye C. B. et Tindimugaya C. 2019. « Review: Challenges and opportunities for sustainable groundwater management in Africa ». *Hydrogeology Journal, vol.* 27, p. 1099 à 1110. doi.org/10.1007/s10040-018-1892-1

Gerbens-Leenes P. W., Hoekstra A. Y. et Van der Meer Th. H. 2008. *Water Footprint of Bio-Energy and Other Primary Energy Carriers*. Value of Water Research Report Series No. 29. Delft, Pays-Bas, UNESCO-IHE Institut pour l'éducation relative à l'eau.

Gerlak A. K., Medgal S. B., Varady R. G. et Richards H. 2013. *Groundwater Governance in the U.S.: Summary of Initial Survey Results*. Mai 2013. Université d'Arizona. wrrc.arizona.edu/sites/wrrc.arizona.edu/files/pdfs/GroundwaterGovernanceReport-FINALMay2013.pdf

Gerland P., Raftery A. E., Ševčíková H., Li N., Gu D., Spoorenberg T., Alkema L., Fosdick B. K., Chunn J., Lalic N., Bay G., Buettner T., Heilig G. K. et Wilmoth J. 2014. « World population stabilization unlikely this century ». *Science*, vol. 346, nº 6206, p. 234 à 237. doi.org/10.1126/science.1257469

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). 2014a. « Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility ». *Changements climatiques 2013 - Les éléments scientifiques.* Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du GIEC. Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, p. 1029 à 1136. www.ipcc.ch/languages-2/francais/publications/

_____. 2014b. Changements climatiques 2014 - Atténuation du changement climatique. Contribution du Groupe de travail III au cinquième Rapport d'évaluation du GIEC. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press. www.ipcc.ch/languages-2/francais/publications/

Gilbrich W. H. et Struckmeier W. F. 2014. *50 Years of Hydro(geo)logical Mapping Activities.* Paris, UNESCO.

Giménez R., Mercau J., Nosetto M., Páez R. et Jobbágy E. 2016. « The ecohydrological imprint of deforestation in the semiarid Chaco: Insights from the last forest remnants of a highly cultivated landscape ». *Hydrological Processes*, vol. 30, nº 15, p. 2603 à 2616. doi.org/10.1002/hyp.10901

Giordano M. 2006. « Agricultural groundwater use and rural livelihoods in Sub-Saharan Africa: A first-cut assessment ». *Hydrogeology Journal*, vol. 14, nº 3, p. 310 à 318. doi.org/10.1007/s10040-005-0479-9

_____. 2009. « Global groundwater? Issues and solutions ». *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 34, nº 1, p. 153 à 178. doi.org/10.1146/annurev.environ.030308.100251

Glazema R. 2003. *Windenergie Cursus Duurzame Energie in Ontwikkelingslanden* [Énergie éolienne. Cursus Énergie durable dans les pays en développement]. Enschede, Pays-Bas, Université de Twente. www.wot.utwente.nl/publications/cde/windenergie.pdf (en néerlandais)

Gleeson T., Wada Y., Bierkens M. F. et Van Beek L. P. 2012. « Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint ». *Nature*, vol. 488, nº 7410, p. 197 à 200. doi.org/10.1038/nature11295

Gleeson T., Befus K., Jasechko S., Luijendijk E. et Cardenas M. B. 2016. « The global volume and distribution of modern groundwater ». *Nature Geoscience*, vol. 9, p. 161 à 167. doi.org/10.1038/ngeo2590

Gleeson T. et Richter B. 2017. « How much groundwater can we pump and protect environmental flows through time? Presumptive standards for conjunctive management of aquifers and rivers ». *River Research and Applications*, vol. 34, nº 1, p. 83 à 92. doi.org/10.1002/rra.3185

Gleeson T., Wang-Erlandsson L., Putkka M., Zipper S. C., Jaramillo F., Gerten D., Fetzer I., Cornell S. E., Piemontese L., Gordon L. J., Rockström J., Oki T., Sivapalan M., Wada Y., Brauman K. A., Flörke M., Bierkens M. F. P., Lehner B., Keys P., Kummu M., Wagener T., Dadson S., Troy T. J., Steffen W., Falkenmark M. et Famiglietti J. S. 2020a. « Illuminating water cycle modifications and Earth system resilience in the Anthropocene ». *Water Resources Research*, vol. 56, nº 4. doi.org/10.1029/2019WR024957

Gleeson T., Cuthbert M., Ferguson G. et Perrone D. 2020b. « Global groundwater sustainability, resources, and systems in the Anthropocene ». *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 48, p. 431 à 463. doi.org/10.1146/annurev-earth-071719-055251

Goldscheider N. et Drew D. (éds.). 2007. *Methods in Karst Hydrogeology: IAH: International Contributions to Hydrogeology*. CRC Press.

Gomes N. 2006. *Access to Water, Pastoral Resource Management and Pastoralists' Livelihoods: Lessons Learned from Water Development in Selected Areas of Eastern Africa (Kenya, Ethiopia, Somalia).* Document de travail nº26 du Programme d'appui aux moyens d'existence (LSP). Rome, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). www.fao.org/documents/card/en/c/2ef1b69b-d980-5860-bd4e-dbf613b8e487/

Gong H., Pan Y., Zheng L., Li X., Zhu L., Zhang C., Huang Z., Li Z., Wang H. et Zhou C. 2018. « Long-term groundwater storage changes and land subsidence development in the North China Plain (1971-2015) ». *Hydrogeology Journal*, vol. 26, p. 1417 à 1427. doi.org/10.1007/s10040-018-1768-4

Goodman A., Sanguinito S. et Levine J. S. 2016. « Prospective CO_2 saline resource estimation methodology: Refinement of existing US-DOE-NETL methods based on data availability ». *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 54, nº 1, p. 242 à 249. doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.09.009

Gorelick S. M. et Zheng C. 2015. « Global change and the groundwater management challenge ». *Water Resources Research*, vol. 51, nº 5, p. 3031 à 3051. doi.org/10.1002/2014WR016825

Goulburn-Murray Water. 2013. *Diverters' Tariff Strategy*. www.g-mwater.com.au/downloads/gmw/currentProjects/Diverters_Tariff_Strategy_Nov13_WEB.pdf

Gouvernement de l'Alberta. 2019. « Quest Carbon Capture and Storage Project ». *Rapport de synthèse annuel 2019*. open.alberta.ca/publications/quest-carbon-capture-and-storage-project-annual-report-2019

Gouvernement de la Nouvelle-Galles du Sud. 2020. *Water Sharing Plan for the NSW Great Artesian Basin Shallow Groundwater Sources Order 2020*. legislation.nsw.gov.au/view/pdf/asmade/sl-2020-347

_____. 2021. *NSW Water Strategy*. Département de la planification, de l'industrie et de l'environnement, Sydney. dpie.nsw.gov.au/water/plans-and-programs/nsw-water-strategy

_____. n.d.a. *How Water is Managed*. L'eau dans la Nouvelle-Galles du Sud. Site web du Gouvernement de la Nouvelle-Galles du Sud. www.industry.nsw.gov.au/water/what-we-do/how-water-is-managed

_____. n.d.b. *Water Reform Action Plan*. L'eau dans la Nouvelle-Galles du Sud. Site web du Gouvernement de la Nouvelle-Galles du Sud. www.industry.nsw.gov.au/water/environmental-water-hub/water-reform-action-plan

Gouvernement du Canada. 2013. *Sources d'eau : Les eaux souterraines*. www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/eau-apercu/sources/eaux-souterraines.html#sub5

Gouvernement du Kazakhstan. 2018. Ob utverždenii Strategičeskogo plana razvitija Respubliki Kazakhstan do 2025 goda i priznanii utrativšimi silu nekotorych ukazov Prezidenta Respubliki Kazakhstan. Ukaz Prezidenta Respubliki Kazakhstan ot 15 fevralja 2018 goda № 636. [Approbation du Plan de développement stratégique jusqu'en 2025 et invalidation de certains décrets du président de la République du Kazakhstan. Décret de la République du Kazakhstan en date du 15 février 2018 (nº 636)]. www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC191496/

Gowing J., Walker D., Parkin G., Forsythe N., Haile A. T. et Ayenew D. A. 2020. « Can shallow groundwater sustain small-scale irrigated agriculture in sub-Saharan Africa? Evidence from N-W Ethiopia ». *Groundwater for Sustainable Development*, vol. 10, art. 100290. doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100290

GRACE 2.0. n.d. *GRACE 2.0 App*. tethys2.byu.edu/apps/newgrace/ (consulté le 17 mars 2021)

Graham G., Allen D. M. et Finkbeiner B. 2015. « Climate controls on nitrate concentration variability in an unconfined aquifer in the Abbotsford-Sumas aquifer, British Columbia ». *Environmental Earth Sciences*, vol. 73, nº 6, p. 2895 à 2907. doi.org/10.1007/s12665-014-3072-5

Grech-Madin C., Döring S., Kim K. et Swain A. 2018. « Negotiating water across levels: A peace and conflict "Toolbox" for water diplomacy ». *Journal of Hydrology*, vol. 559, p. 100 à 109. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.008

Green T. R., Taniguchi M., Kooi H., Gurdak J. J., Allen D. M., Hiscock K. M., Treidel H. et Aureli A. 2011. « Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater ». *Journal of Hydrology*, vol. 405, nº 3 et 4, p. 532 à 560. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.002

Grey D. et Sadoff C. W. 2007. « Sink or swim? Water security for growth and development ». *Water Policy*, vol. 9, nº 6, p. 545 à 571. doi.org/10.2166/wp.2007.021

Griebler C. et Avramov M. 2015. « Groundwater ecosystem services: A review ». *Freshwater Science*, vol. 34, nº 1, p. 355 à 367. doi.org/10.1086/679903

Grönwall J. 2011. « Groundwater dependence among poor urban people: Out of sight is out of mind? » *International Journal Urban Sustainable Development*, vol. 3, nº 1, p. 26 à 39. doi.org/10.1080/19463138.2010.547042

_____. 2016. « Self-supply and accountability: To govern or not to govern groundwater for the (peri-) urban poor in Accra, Ghana ». *Environmental Earth Science*, vol. 75, art. 1163. doi.org/10.1007/s12665-016-5978-6

Grönwall J. et Danert K. 2020. « Regarding groundwater and drinking water access through a human rights lens: Self-supply as a norm ». *Water*, vol. 12, nº 2, art. 419. doi.org/10.3390/w12020419

Grönwall J. et Jonsson A. C. 2017a. « Regulating effluents from India's textile sector: New commands and compliance monitoring for Zero Liquid Discharge ». *Law, Environment and Development Journal*, vol. 13, nº 1.

_____. 2017b. « The Impact of 'zero' coming into fashion: Zero Liquid Discharge uptake and socio-technical transitions in Tirupur ». *Water Alternatives*, vol. 10, nº 2, p. 602 à 624. www.water-alternatives.org/index.php/alldoc/articles/vol10/v10issue2/372-a10-2-22/file

Grönwall J., Mulenga M. et McGranahan G. 2010. *Groundwater, Self-Supply and Poor Urban Dwellers: A Review with Case Studies of Bangalore and Lusaka*. Human Settlements Working Paper Series — Water and Sanitation nº 26. Londres, Institut international pour l'environnement et le développement (IIED). pubs.iied.org/10584iied

Grönwall J. et Oduro-Kwarteng S. 2018. « Groundwater as a strategic resource for improved resilience: A case study from peri-urban Accra » *Environmental Earth Sciences*, vol. 77, art. 6. doi.org/10.1007/s12665-017-7181-9

Groundwater Governance Project (Projet Gestion des ressources en eaux souterraines). 2016a. *Global Diagnostic on Groundwater Governance*. Rome, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). www.fao.org/3/i5706e/i5706e.pdf

_____. 2016b. *Shared Global Vision for Groundwater Governance 2030 and a Call-for-Action*. Édition révisée. Rome, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). www.fao.org/3/a-i5508e.pdf

_____. 2016c. *Global Framework for Action to Achieve the Vision on Groundwater Governance*. Rome, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). www.fao.org/3/a-i5705e.pdf

Groupe de haut niveau sur l'eau (HLPW). 2018. *Making Every Drop Count: An Agenda for Water Action.* HLPW Outcome Report. New York, ONU/Groupe de la Banque mondiale. sustainabledevelopment.un.org/content/documents/17825HLPW_Outcome.pdf

Güntner A., Schmidt R. et Döll P. 2007. « Supporting large-scale hydrogeological monitoring and modelling by time-variable gravity data ». *Hydrogeology Journal*, vol. 15, nº 1, p. 167 à 170. doi.org/10.1007/s10040-006-0089-1

Guppy L., Uyttendaele P., Villholth K. G. et Smakhtin V. 2018. *Groundwater and Sustainable Development Goals: Analysis of Interlinkages*. Série de comptes rendus No. 4 UNU-INWEH. Hamilton, Ontario, Institut pour l'eau, l'environnement et la santé de l'Université des Nations Unies (UNU-INWEH). inweh.unu.edu/groundwater-and-sustainable-development-goals-analysis-of-interlinkages/

Gurdak J. J., Hanson R. T., McMahon P. B., Bruce B. W., McCray J. E., Thyne G. D. et Reedy R. C. 2007. « Climate variability controls on unsaturated water and chemical movement, High Plains aquifer, USA ». *Vadose Zone Journal*, vol. 6, nº 3, p. 533 à 547. doi.org/10.2136/vzj2006.0087

Guzy A. et Malinowska A. A. 2020. « State of the art and recent advancements in modelling of land subsidence induced by groundwater withdrawal ». *Water*, vol. 12, nº 7, art. 2051. doi.org/10.3390/w12072051

GWP (Partenariat mondial pour l'eau). 2017. *Groundwater Management Plans (C4.03)*. GWP. www.gwp.org/en/learn/iwrm-toolbox/Management-Instruments/Planning_for_IWRM/Groundwater_management_plans/ (consulté le 24 mai 2021)

H

Haacker E. M. K., Kendall A. D. et Hyndman D. W. 2016. « Water level declines in the High Plains aquifer: Predevelopment to resource senescence ». *Groundwater*, vol. 54, nº 2, p. 231 à 242. doi.org/10.1111/gwat.12350

Han Z. et Cheng M. 2013. « History of Hydrogeology in China ». N. Howden et J. Mather (éds.), *History of Hydrogeology. IAH International Contributions to Hydrogeology,* vol. 28, Boca Raton, Floride/Londres/New York/Leyde, Pays-Bas, CRC Press/Balkema, p. 4 à 46.

Haque S., Nahar N. et Sayem S. 2021. « Industrial water management and sustainability: Development of SIWP tool for textile industries of Bangladesh ». *Water Resources and Industry*, vol. 25, art. 100145. doi.org/10.1016/j.wri.2021.100145

Hara K. 2006. « Groundwater contamination and quality management policy in Asia ». *International Review for Environmental Strategies*, vol. 6, nº 2, p. 291 à 306.

Harlan R. L., Kolm K. E. et Gutentag E. D. 1989. *Water-Well Design and Construction. Developments in Geotechnical Engineering*. Amsterdam/Oxford, Royaume-Uni/New York/Tokyo, Elsevier.

Harpold A. A. et Kohler M. 2017. « Potential for changing extreme snowmelt and rainfall events in the mountains of western United States ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 122, nº 24, p. 13219 à 13228. doi.org/10.1002/2017JD027704

Harris I., Jones P. D., Osborn T. J. et Lister D. H. 2014. « Updated high-resolution grids of monthly climatic observations — The CRU TS3.10 Dataset ». *International Journal of Climatology*, vol. 34, nº 3, p. 623 à 642. doi.org/10.1002/joc.3711

Harris M. 2015. « China's sponge cities: Soaking up water to reduce flood risks ». *The Guardian*, 1er octobre 2015.

Hayashi M. 2013. « The cold vadose zone: Hydrological and ecological significance of frozen-soil processes ». *Vadose Zone Journal*, vol. 12, nº 4, p. 1 à 8. doi.org/10.2136/vzj2013.03.0064

Healy A., Allan S., Bristow G., Capstick S., Danert K., Goni I., MacDonald A.M., Tijani M., Upton K. et Whitmarsh L. 2017. *Individual Water Sourcing: Understanding Risks and Resilience of Groundwater Resource Abstraction in Nigeria.* 40ème Conférence internationale du Water, Engineering and Development Centre (WEDC), Loughborough, Royaume-Uni.

Healy A., Upton K., Capstick S., Bristow G., Tijani M., MacDonald A.M., Goni I., Bukar Y., Whitmarsh L., Theis S., Danert K. et Allan S. 2020. « Domestic groundwater abstraction in Lagos, Nigeria: A disjuncture in the science-policy-practice interface? » *Environmental Research Letters*, vol. 15, nº 4, art. 045006. doi.org/10.1088/1748-9326/ab7463

Healy R. W. 2010. *Estimating Groundwater Recharge*. Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press. doi.org/10.1017/CBO9780511780745

Heinke J., Lannerstad M., Gerten D., Havlík P., Herrero M., Notenbaert A. M. O., Hoff H. et Müller C. 2020. « Water use in global livestock production — Opportunities and constraints for increasing water productivity ». *Water Resources Research*, vol. 56, nº 12, e2019WR026995. doi.org/10.1029/2019WR026995

Herrera-García G., Ezquerro P., Tomás R., Béjar-Pizarro M., López-Vinielles J., Rossi M., Mateos R. M., Carreón-Freyre D., Lambert J., Teatini P., Cabral-Cano E., Erkens G., Galloway D., Hung W.-C., Kakar N., Sneed M., Tosi L., Wang H. et Ye S. 2020. « Mapping the global threat of land subsidence ». *Science*, vol. 371, nº 6524, p. 34 à 36. doi.org/10.1126/science.abb8549

Hinsby K., Condesso de Melo M. T. et Dahl M. 2008. « European case studies supporting the derivation of natural background levels and groundwater threshold values for the protection of dependent ecosystems and human health ». *Science of the Total Environment*, vol. 401, nº 1 à 3, p. 1 à 20. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.03.018

Hirji R. F., Mandal S. et Pangare G. 2017. *South Asia Groundwater Forum: Regional Challenges and Opportunities for Building Drought and Climate Resilience for Farmers, Cities, and Villages*. Washington, D.C., Banque mondiale. documents.worldbank.org/curated/fr/917111513695938541/South-Asia-groundwater-forum-regional-challenges-and-opportunities-for-building-drought-and-climate-resilience-for-farmers-cities-and-villages

Hiscock K., Sparkes R. et Hodgson A. 2011. « Evaluation of future climate change impacts on European groundwater resources ». H. Treidel, J. L. Martin-Bordes et J. J. Gurdak (éds.), *Climate Change Effects on Groundwater Resources: A Global Synthesis of Findings and Recommendations*. Londres, CRC Press, p. 351 à 365. doi.org/10.1201/b11611

Hodgson S. 2016. *Exploring the Concept of Water Tenure*. Land and Water Discussion Paper No. 10. Rome, FAO. www.fao.org/publications/card/en/c/f5d1fc87-ac13-438d-8957-4f7214b0ea55/

Hoekstra A. Y. 2018. « Global food and trade dimensions of groundwater governance ». K. G. Villholth, E. Lopez-Gunn, K. Conti, A. Garrido et J. van der Gun (éds.), *Advances in Groundwater Governance*. Leyde, Pays-Bas, CRC Press/Balkema, p. 353 à 366.

Hofmann J., Venohr M., Behrendt H. et Opitz D. 2010. « Integrated water resources management in central Asia: Nutrient and heavy metal emissions and their relevance for the Kharaa River Basin, Mongolia ». *Water Science and Technology*, vol. 62, nº 2, p. 353 à 363. doi.org/10.2166/wst.2010.262

Hofmann J., Watson V. et Scharaw B. 2015. « Groundwater quality under stress: Contaminants in the Kharaa River basin (Mongolia) ». *Environmental Earth Sciences*, vol. 73, p. 629 à 648. doi.org/10.1007/s12665-014-3148-2

Hogeboom R. J., Kamphuis I. et Hoekstra A. Y. 2018. « Water sustainability of investors: Development and application of an assessment framework ». *Journal of Cleaner Production*, vol. 202, p. 642 à 648. doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.142

Holding S. et Allen D. M. 2015. « From days to decades: Numerical modeling of freshwater lens response to climate change stressors on small islands ». *Hydrology and Earth System Science*, vol. 19, p. 933 à 949. doi.org/10.5194/hess-19-933-2015

Holding S., Allen D. M., Foster S., Hsieh A., Larocque I., Klassen J. et Van Pelt S. C. 2016. « Groundwater vulnerability on small islands ». *Nature Climate Change*, vol. 6, p. 1100 à 1103. doi.org/10.1038/nclimate3128

Holmgren J. M. et Werner M. J. 2021. « Raspberry shake instruments provide initial ground-motion assessment of the induced seismicity at the United Downs deep geothermal power project in Cornwall, United Kingdom ». *The Seismic Record,* vol. 1, nº 1, p. 27 à 34. doi.org//10.1785/0320210010

Hoogeveen J., Faurès J.-M., Peiser L., Burke J. et Van de Giesen N. 2015. « GlobWat — A global water balance model to assess water use in irrigated agriculture ». *Hydrology and Earth System Science*, vol. 19, nº9, p. 3829 à 3844. doi.org/10.5194/hess-19-3829-2015

Hora T., Srinivasan V. et Basu N.B. 2019. « The groundwater recovery paradox in South India ». *Geophysical Research Letters*, vol. 46, nº 16, p. 9602 à 9611. doi.org/10.1029/2019GL083525

Hosono T., Ono M., Burnett W. C., Tokunaga T., Taniguchi M. et Akimichi T. 2012. « Spatial distribution of submarine groundwater discharge and associated nutrients within a local coastal area ». *Environmental Science & Technology*, vol. 46, nº 10, p. 5319 à 5326. doi.org/10.1021/es2043867

Houéménou H., Tweed S., Dobigny G., Mama D., Alassane A., Silmer R., Babic M., Ruy S., Chaigneau A., Gauthier P., Socohou A., Dossou H.-J., Badou S. et Leblanc M. 2020. « Degradation of groundwater quality in expanding cities in West Africa. A case study of the unregulated shallow aquifer in Cotonou ». *Journal of Hydrology*, vol. 582, art. 124438. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124438

Howard J. et Merrifield M. 2010. « Mapping Groundwater Dependent Ecosystems in California ». *PLoS One*, vol. 5, nº 6, e11249. doi.org/10.1371/journal.pone.0011249

Hu K., Awange J., Khandu K., Forootan E., Mikosz Goncalves R. et Fleming K. 2017. « Hydrogeological characterisation of groundwater over Brazil using remotely sensed and model products ». *Science of The Total Environment*, vol. 599 à 600, p. 372 à 386. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.188

Hughes D. A., Kingston D. G. et Todd M. C. 2011. « Uncertainty in water resources availability in the Okavango River basin as a result of climate change ». *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 15, nº 3, p. 931 à 941. doi.org/10.5194/hess-15-931-2011

Humphreys W. F. 2006. « Aquifers: the ultimate groundwater-dependent ecosystems ». *Australian Journal of Botany*, vol. 54, nº 2, p. 115 à 132. doi.org/10.1071/BT04151

Huss M. et Hock R. 2018. « Global-scale hydrological response to future glacier mass loss ». *Nature Climate Change*, vol. 8, p. 135 à 140. doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x

Hutton G. et Varughese M. 2016. *The Costs of Meeting the 2030 Sustainable Development Goal Targets on Drinking Water, Sanitation, and Hygiene*. Étude technique du Programme Eau et Assainissement. Washington, D.C., Banque mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/23681

Huttrer G. W. 2021. « Geothermal power generation in the world 2015-2020 update report ». *Proceedings World Geothermal Congress 2020+1*. Reykjavik, avril à octobre 2021.

Hynds P., Regan S., Andrade L., Mooney S., O'Malley K., DiPelino S. et O'Dwyer J. 2018. « Muddy waters: Refining the way forward for the "sustainability science" of socio-hydrogeology ». *Water*, vol. 10, nº 9, art. 1111. doi.org/10.3390/w10091111

I

ICTA-UAB (Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals, Universitat Autònoma de Barcelona). n.d. *Environmental Justice Atlas*. ejatlas.org/commodity/water (consulté le 21 juin 2021)

Idowu T. E. et Lasisi K. H. 2020. « Seawater intrusion in the coastal aquifers of East and Horn of Africa: A review from a regional perspective ». *Scientific African*, vol. 8, e00402. doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00402

IGB (Institut Leibniz d'écologie des eaux douces et des pêches intérieures). 2020. *IGB Position regarding the Tesla Building Project in Grünheide*. www.igb-berlin.de/en/news/igb-position-regarding-tesla-building-project-grunheide

IGRAC (Centre international d'évaluation des ressources en eaux souterraines). 2014. *Groundwater Monitoring in Latin America*. Rapport de synthèse des informations partagées lors de l'atelier régional sur la surveillance des eaux souterraines. IGRAC. www.un-igrac.org/resource/groundwater-monitoring-latin-america

_____. 2016. *Investor Risk Analysis: Why Groundwater Matters? The Value of Groundwater*. Delft, Pays-Bas, IGRAC. www.un-igrac.org/resource/investor-risk-analysis-why-groundwater-matters

_____. 2020. *National Groundwater Monitoring Programmes: A Global Overview of Quantitative Groundwater Monitoring Networks*. Delft, Pays-Bas, IGRAC. www.un-igrac.org/stories/national-groundwater-monitoring-programmes

_____. 2021. *Aquifères transfrontaliers du monde* [carte]. Édition 2021. Échelle 1 : 50 000 000. Delft, Pays-Bas, IGRAC. www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/2021TBAMap_UNESCO%20Version.pdf ; unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380193

_____. n.d. *The Global Groundwater Information System (GGIS)*. ggis.un-igrac.org

IGRAC/UNESCO-PHI (Centre international d'évaluation des ressources en eaux souterraines/Programme hydrologique intergouvernemental de l'UNESCO). 2015. *Guidelines for Multidisciplinary Assessment of Transboundary Aquifers*. Version préliminaire. Septembre 2015. Delft, Pays-Bas, PNUE. www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/TWAP%20Volume%201%20Transboundary%20Aquifers%20and%20Groundwater%20Systems%20of%20Small%20Island%20Developing%20States.pdf

Ionescu D., Siebert C., Polerecky L., Munwes Y. Y., Lott C., Häusler S., Bizić-Ionescu M., Quast C., Peplies J., Glockner F. O., Ramette A., Rödiger T., Dittmar T., Oren A., Geyer S., Stärk H.-J., Sauter M., Licha T., Laronne J. B. et De Beer D. 2012. « Microbial and chemical characterization of underwater fresh water springs in the Dead Sea ». *PLoS One*, vol. 7, nº 6, e38319. doi.org/10.1371/journal.pone.0038319

IPBES (Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques). 2019. *The Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services*. S. Díaz, J. Settele, E. S. Brondízio, H. T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K. A. Brauman, S. H. M. Butchart, K. M. A. Chan, L. A. Garibaldi, K. Ichii, J. Liu, S. M. Subramanian, G. F. Midgley, P. Miloslavich, Z. Molnár, D. Obura, A. Pfaff, S. Polasky, A. Purvis, J. Razzaque, B. Reyers, R. Roy Chowdhury, Y. J. Shin, I. J. Visseren-Hamakers, K. J. Willis et C. N. Zayas (éds.). Bonn, Allemagne, Secrétariat de l'IPBES. doi.org/10.5281/zenodo.3553579

IPES-Food (Panel international d'experts sur les systèmes alimentaires durables). 2018. *Breaking Away from Industrial Food and Farming Systems: Seven Case Studies of Agroecological Transition*. www.ipes-food.org/_img/upload/files/CS2_web.pdf

Izydorczyk K., Frątczak W., Drobniewska A., Cichowicz E., Michalska-Hejduk D., Gross R. et Zalewski M. 2013. « A biogeochemical barrier to enhance a buffer zone for reducing diffuse phosphorus pollution — Preliminary results ». *Ecohydrology & Hydrobiology*, vol. 13, nº 2, p. 104 à 112. doi.org/10.1016/j.ecohyd.2013.06.003

Jacobsen M., Webster M. et Vairavamoorthy K. (éds.). 2013. *The Future of Water in African Cities: Why Waste Water?* Washington, D.C., Banque mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/11964 Licence : CC BY 3.0 IGO.

Jadeja Y., Maheshwari B., Packham R., Bohra H., Purohit R., Thaker B., Dillon P., Oza S., Dave S., Soni P., Dashora Y., Dashora R., Shah T., Gorsiya J., Katara P., Ward J., Kookana R., Singh P. K., Chinnasamy P., Goradiya V., Prathapar S., Varua M. et Chew M. 2018. « Managing aquifer recharge and sustaining groundwater use: Developing a capacity building program for creating local groundwater champions ». *Sustainable Water Resources Management*, vol. 4, p. 317 à 329. doi.org/10.1007/s40899-018-0228-6

Jakeman A. J., Barreteau O., Hunt R. J., Rinaudo J.-D. et Ross A. 2016. *Integrated Groundwater Management: Concepts, Approaches and Challenges*. Springer Open.

Jamali Jaghdani T. et Kvartiuk V. 2021. « The energy-water nexus in Iran: The political economy of energy subsidies for groundwater pumping ». S. Hülsmann et M. Jampani (éds.), *A Nexus Approach for Sustainable Development*. Cham, Suisse, Springer. doi.org/10.1007/978-3-030-57530-4_8

Jamil A., Riaz S., Ashraf M. et Foolad M. R. 2011. « Gene expression profiling of plants under salt stress ». *Critical Reviews in Plant Sciences*, vol. 30, nº 5, p. 435 à 458. doi.org/10.1080/07352689.2011.605739

Jarraya-Horriche F., Benabdallah S. et Ayadi M. 2020. « Groundwater monitoring for assessing artificial recharge in the Mediterranean coastal aquifer of Korba (Northeastern Tunisia) ». *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 192, nº 7, art. 422. doi.org/10.1007/s10661-020-08408-w

Jasechko S. et Taylor R. G. 2015. « Intensive rainfall recharges tropical groundwaters ». *Environmental Research Letters*, vol. 10, nº 12, art. 124015. doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124015

Jasechko S., Seybold H., Perrone D., Fan Y. et Kirchner J. W. 2021. « Widespread potential loss of streamflow into underlying aquifers across the USA ». *Nature*, vol. 591, p. 391 à 395. doi.org/10.1038/s41586-021-03311-x

Jia X., O'Connor D., Hou D., Jin Y., Li G., Zheng C., Ok Y. S., Tsang D. C. W. et Luo J. 2019. « Groundwater depletion and contamination: Spatial distribution of groundwater resources sustainability in China ». *Science of The Total Environment*, vol. 672, p. 551 à 562. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.457

Kadhem G. M. et Zubari W. K. 2020. « Identifying optimal locations for artificial groundwater recharge by rainfall in the Kingdom of Bahrain ». *Earth Systems and Environnement*, vol. 4, p. 551 à 566. doi.org/10.1007/s41748-020-00178-2

Kalbus E., Reinstorf F. et Schirmer M. 2006. « Measuring methods for groundwater-surface water interactions: A review ». *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 10, nº6, p. 873 à 887. doi.org/10.5194/hess-10-873-2006

Kataoka Y. et Shivakoti B. R. 2013. *Groundwater Governance Regional Diagnosis: Asia and the Pacific Region*. IGES (Institut des stratégies environnementales mondiales).

Kelkar Khambete A. 2020. *The Karnataka State Water Policy 2019*. India Water Portal. 20 janvier 2020. www.indiawaterportal.org/articles/karnataka-state-water-policy-2019

Kemper K. E. 2007. « Instruments and institutions for groundwater management ». M. Giordano et K. Villholth (éds), *The Agricultural Groundwater Revolution: Opportunities and Threats to Development*. Wallingford, Royaume-Uni, CABI (Centre international pour l'agriculture et les biosciences). p. 153 à 172.

Ketabchi H., Mahmoodzadeh D., Ataie-Ashtiani B. et Simmons C. T. 2016. « Sea-level rise impacts on seawater intrusion in coastal aquifers: Review and integration ». *Journal of Hydrology*, vol. 535, p. 235 à 255. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.083

Kidmose J., Refsgaard J. C., Troldborg L., Seaby L. P. et Escrivà M. M. 2013. « Climate change impact on groundwater levels: Ensemble modelling of extreme values ». *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 17, p. 1619 à 1634. doi.org/10.5194/hess-17-1619-2013

Kim S. G. et Kim G.-B. 2019. « Are groundwater monitoring networks economical? Cost-benefit analysis on the long-term groundwater supply project of South Korea ». *Water*, vol. 11, nº 4, art. 753. doi.org/10.3390/w11040753

Kiparsky M., Milman A., Owen D. et Fisher A. T. 2017. « The importance of institutional design for distributed local-level governance of groundwater: The case of California's Sustainable Groundwater Management Act ». *Water*, vol. 9, nº 10, art. 755. doi.org/10.3390/w9100755

Kiran S. et Rao V. 2019. « Zero Liquid Discharge implementation in textile industry — Challenges and way forward ». *Journal of Engineering Sciences*, vol. 10, nº 9, p. 205 à 208.

Kiron M. I. 2014. *Water Consumption in Textile Processing Industry*. Textile Learner, 27 avril 2014. www.textilelearner.net/water-consumption-in-textile-processing-industry/

Klausmeyer K., Howard J., Keeler-Wolf T., Davis-Fadtke K., Hull R. et Lyons A. 2018. *Mapping Indicators of Groundwater Dependent Ecosystems in California: Methods Report*. San Francisco, Californie. groundwaterresourcehub.org/public/uploads/pdfs/iGDE_data_paper_20180423.pdf

Klausmeyer K., Howard J., Rohde M. M. et Stanley C. n.d. *Natural Communities Commonly Associated with Groundwater Version 2.0 (NCCAG 2.0)*. Base de données de The Nature Conservancy. www.scienceforconservation.org/products/natural-communities-groundwater-v2 (consulté le 9 mai 2021)

Kløve B. Ala-aho P., Bertrand G., Gurdak J. J., Kupfersberger H., Kværner J., Muotka T., Mykrä H., Preda E., Rossi P., Bertacchi Uvo C., Velasco E. et Pulido-Velazquez M. 2014. « Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems ». *Journal of Hydrology*, vol. 518, partie B, p. 250 à 266. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.037

Kløve B., Ala-aho P., Bertrand G., Boukalova Z., Ertürk A., Goldscheider N., Ilmonen J., Karakaya N., Kupfersberger H., Kvœrner J., Lundberg A., Mileusnić M., Moszczynska A., Muotka T., Preda E., Rossi P., Siergieiev D., Šimek J., Wachniew P., Angheluta V. et Widerlund A. 2011. « Groundwater dependent ecosystems. Part I: Hydroecological status and trends ». *Environmental Science & Policy*, vol. 14, nº 7, p. 770 à 781. doi.org/10.1016/j.envsci.2011.04.002

Knobeloch L., Salna B., Hogan A., Postle J. et Anderson H. 2000. « Blue babies and nitrate-contaminated well water ». *Environmental Health Perspectives*, vol. 108, nº 7, p. 675 à 678. doi.org/10.1289/ehp.00108675

Kolker J. E., Kingdom B., Trémolet S., Winpenny J. et Cardone R. 2016. *Financing Options for the 2030 Water Agenda*. Water Global Practice Knowledge Brief. Washington, D.C., Banque mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/25495

Kolusu S. R., Shamsudduha M., Todd M. C., Taylor R. G., Seddon D., Kashaigili J. J., Ebrahim G. Y., Cuthbert M. O., Sorensen J. P. R., Villholth K. G., MacDonald A. M. et MacLeod D. A., 2019. « The El Niño event of 2015-2016: Climate anomalies and their impact on groundwater resources in East and Southern Africa ». *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 23, p. 1751 à 1762. doi.org/10.5194/hess-23-1751-2019

Konikow L. F. 2011. « Contribution of global groundwater depletion since 1900 to sea-level rise ». *Geophysical Research Letters*, vol, 38, nº 17, art. L17401. doi.org/10.1029/2011GL048604

_____. 2013. « Overestimated water storage ». *Nature Geoscience*, vol. 6, p. 3. doi.org/10.1038/ngeo1659

Korzun V. (éd.). 1974. *Mirovoj vodnyj balans i vodnye resursy Zemli* [Équilibre hydrique mondial et ressources en eau de la Terre]. Leningrad, URSS, Hidrometeoizdat (en russe).

Kotwicki V. 2009. « Water balance of Earth ». *Hydrological Sciences Journal*, vol. 54, nº 5, p. 829 à 840. doi.org/10.1623/hysj.54.5.829

Kowalczyk A., Witkowski A., Rozkowski A., Szczepanski A., Rogoz M., Przybylek J. et Stasko S. 2010. « What Polish mining owes to Polish hydrogeology ». *Przeglad Geologiczny*, vol. 58, nº 9, p. 776 à 788.

Kramers L., Van Wees J.-D., Pluymaekers M. P. D., Kronimus A. et Boxem T. 2012. « Direct heat resource assessment and subsurface information systems for geothermal aquifers; The Dutch perspective ». *Netherlands Journal of Geosciences*, vol. 91, nº 4, p. 637 à 649. doi.org/10.1017/S0016774600000421

Kreamer D. K. et Springer A. E. 2008. « The Hydrology of Desert Springs in North America ». L. E. Stevens et V. J. Meretsky (éds.), *Aridland Springs in North America, Ecology and Conservation*. Tucson, Arizona, University of Arizona Press.

Kreamer D. K., Stevens L. E. et Ledbetter J. D. 2015. « Groundwater dependent ecosystems — Science, challenges, and policy directions ». S. Adelana (éds.), *Groundwater: Hydrogeochemistry, Environmental Impacts and Management Practices*. Hauppauge, New York, Nova Science Publishers, p. 205 à 230.

Kuhn O. 2004. « Ancient Chinese drilling ». *CSEG Recorder*, vol. 29, nº 6. csegrecorder.com/articles/view/ancient-chinese-drilling

Kulongoski J. T. et McMahon P. B. 2019. « Methane emissions from groundwater pumping in the USA ». *npj Climate and Atmospheric Science*, vol. 2, art. 11. doi.org/10.1038/s41612-019-0068-6

Lall U., Josset L. et Russo T. 2020. « A snapshot of the world's groundwater challenges ». *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 45, nº 1, p. 171 à 194. doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-025800

Lamontagne-Hallé P., McKenzie J. M., Kurylyk B. L. et Zipper S. C. 2018. « Changing groundwater discharge dynamics in permafrost regions ». *Environmental Research Letters*, vol. 13, nº 8, art. 084017. doi.org/10.1088/1748-9326/aad404

Lapworth D. J., Baran N., Stuart M. E. et Ward R. S. 2012. « Emerging organic contaminants in groundwater: A review of sources, fate and occurrence ». *Environmental Pollution*, vol. 163, p. 287 à 303. doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.034

Lapworth D. J., Das P., Shaw A., Mukherjee A., Civil W., Petersen J. O., Gooddy D. C., Wakefield O., Finlayson A., Krishan G., Sengupta P. et MacDonald A. M. 2018. « Deep urban groundwater vulnerability in India revealed through the use of emerging organic contaminants and residence time tracers ». *Environmental Pollution*, vol. 240, p. 938 à 949. doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.053

Lapworth D. J., MacDonald A. M., Kebede S., Owor M., Chavula G., Fallas H., Wilson P., Ward J. S. T., Lark M., Okullo J., Mwathunga E., Banda S., Gwengweya G., Nedaw D., Jumbo S., Banks E., Cook P. et Casey V. 2020. « Drinking water quality from rural handpump-boreholes in Africa ». *Environmental Research Letters*, vol. 15, nº 6. doi.org/10.1088/1748-9326/ab8031

Lapworth D. J., Nkhuwa D. C. W., Okotto-Okotto J., Pedley S., Stuart M. E., Tijani M. N. et Wright J. 2017. « Urban groundwater quality in sub-Saharan Africa: Current status and implications for water security and public health ». *Hydrogeology Journal*, vol. 25, p. 1093 à 1116. doi.org/10.1007/s10040-016-1516-6

Larned S. T., Datry T., Arscott D. B. et Tockner K. 2010. « Emerging concepts in temporary-river ecology ». *Freshwater Biology*, vol. 55, nº 4, p. 717 à 738. doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02322.x

Le Luu T. 2019. « Remarks on the current quality of groundwater in Vietnam ». *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, p. 1163 à 1169. doi.org/10.1007/s11356-017-9631-z

Leblanc M. J., Tregoning P., Ramillien G., Tweed S. O. et Fakes A. 2009. « Basin-scale, integrated observations of the early 21st century multiyear drought in southeast Australia ». *Water Resources Research*, vol. 45, nº 4, W04408. doi.org/10.1029/2008WR007333

Lecher A. L. et Mackey K. R. M. 2018. « Synthesizing the Effects of Submarine Groundwater Discharge on Marine Biota ». *Hydrology*, vol. 5, nº 4, art. 60. doi.org/10.3390/hydrology5040060

Lee E., Jayakumar R., Shrestha S. et Han Z. 2018. « Assessment of transboundary aquifer resources in Asia: Status and progress towards sustainable groundwater management ». *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 20, p. 103 à 115. doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.01.004

Lee S.-Y., Swager L., Pekot L., Piercey M., Will R. et Zaluski W. 2018. « Study of operational dynamic data in Aquistore project ». *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 76, p. 62 à 77. doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.06.008

Lemke P., Ren J., Alley R. B., Allison I., Carrasco J., Flato G., Fujii Y., Kaser G., Mote P., Thomas R. H. et Zhang T. 2007. « Observations: Changes in snow, ice and frozen ground ». S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor et H. L. Miller (éds.), *Changements Climatiques 2007 - Les Éléments scientifiques*. Contribution du Groupe de travail I à la quatrième Évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, p. 337 à 383. www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/02/ar4-wg1-sum-vol-fr.pdf

Li X., Atwill E. R., Antaki E., Applegate O., Bergamaschi B., Bond R. F., Chase J., Ransom K. M., Samuels W. et Watanabe N. 2015. « Fecal indicator and pathogenic bacteria and their antibiotic resistance in alluvial groundwater of an irrigated agricultural region with dairies ». *Journal of Environmental Quality*, vol. 44, nº 5, p. 1435 à 1447. doi.org/10.2134/jeq2015.03.0139

Liao X. et Ming J. 2019. « Pressures imposed by energy production on compliance with China's 'Three Red Lines' water policy in water-scarce provinces ». *Water Policy*, vol. 21, nº 1, p. 38 à 48. doi.org/10.2166/wp.2018.211

Liljedahl A. K., Gädeke A., O'Neel S., Gatesman T. A. et Douglas T. A. 2017. « Glacierized headwater streams as aquifer recharge corridors, subarctic Alaska ». *Geophysical Research Letters*, vol. 44, nº 13, p. 6876 à 6885. doi.org/10.1002/2017GL073834

Linton J. et Brooks D. 2011. « Governance of transboundary aquifers: New challenges and new opportunities ». *Water International*, vol. 36, nº 5. doi.org/10.1080/02508060.2011.599312

Lipponen A. et Chilton J. 2018. « Development of cooperation on managing transboundary groundwaters in the pan-European region: The role of international frameworks and joint assessments ». *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 20, p. 145 à 157. doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.05.001

Liu C. M., Yu J. J. et Kendy E. 2010. « Groundwater exploitation and its impact on the environment in the North China Plain ». *Water International*, vol. 26, nº 2, p. 265 à 272. doi.org/10.1080/02508060108686913

Liu J. et Zheng C. 2016. « Towards integrated groundwater management in China ». A. J. Jakeman, O. Barreteau, R. J. Hunt, J.-D. Rinaudo et A. Ross (éds.), *Integrated Groundwater Management: Concepts, Approaches and Challenges*. Cham, Suisse, Springer International Publishing, p. 455 à 475. doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9_18

Liu T., Bruins R. J. F. et Heberling M. T. 2018. « Factors influencing farmers' adoption of best management practices: A review and synthesis ». *Sustainability*, vol. 10, nº 2, art. 432. doi.org/10.3390/su10020432

Lowenberg-DeBoer J. et Erickson B. 2019. « Setting the record straight on precision agriculture adoption ». *Agronomy Journal*, vol. 111, nº 4, p. 1552 à 1569. doi.org/10.2134/agronj2018.12.0779

Luijendijk E., Gleeson T. et Moosdorf N. 2020. « Fresh groundwater discharge insignificant for the world's oceans but important for coastal ecosystems ». *Nature Communications*, vol. 11, nº 1, art. 1260. doi.org/10.1038/s41467-020-15064-8

Lund J. W. et Tóth A. N. 2020. « Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review ». *Ecological Indicators*, vol. 90, art. 101915. doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101915

Lundgren E. J., Ramp D., Stromberg J. C., Wu J., Nieto N.C., Sluk M., Moeller K. T. et Wallach A. D. 2021. « Equids engineer desert water availability ». *Science*, vol. 372, nº 6541, p. 491 à 495. doi.org/10.1126/science.abd6775

Lytton L., Ali A., Garthwaite B., Punthakey J. F. et Saeed B. 2021. *Groundwater in Pakistan's Indus Basin: Present and Future Prospects*. Washington, D.C., Banque mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35065

Lyuta N., Sanina I., Biarozka O., Vasniova O., Scheidleder A. et Humer F. 2021. *Transboundary Subparts of Groundwater Bodies (GWB) and Transboundary Monitoring Network of the Republic of Belarus and the Ukraine Developed under the European Water Initiative Plus for Eastern Partnership Countries (EUWI+).* Assemblée générale de l'Union européenne des géosciences 2021, résumé 4599. www.euwipluseast.eu/en/component/k2/item/1788-ukraine-belarus-abstract-for-the-egu21-conference-on-transboundary-groundwater-bodies-2021-eng

M

MacAllister D. J., MacDonald A. M., Kebede S., Godfrey S. et Calow R. 2020. « Comparative performance of rural water supplies during drought ». *Nature Communications*, vol. 11, art. 1099. doi.org/10.1038/s41467-020-14839-3

MacDonald A. M. et Calow R. C. 2009. « Developing groundwater for secure rural water supplies in Africa ». *Desalination*, vol. 248, nº 1 à 3, p. 546 à 556. doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.100

MacDonald A. M., Bonsor H. C., Dochartaigh B. É. Ó. et Taylor R. G. 2012. « Quantitative maps of groundwater resources in Africa. Environmental ». Research Letters, vol. 7, nº 2, art. 024009. doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024009

MacDonald A. M., Bonsor H. C., Ahmed K. M., Burgess W. G., Basharat M., Calow R. C., Dixit A., Foster S. S. D., Gopal K., Lapworth D. J., Lark R. M., Moench M., Mukherjee A., Rao M. S., Shamsudduha M., Smith L., Taylor R. G., Tucker J., Van Steenbergen F. et Yadav S. K. 2016. « Groundwater quality and depletion in the Indo-Gangetic Basin mapped from in situ observations ». Nature Geoscience, vol. 9, nº 10, p. 762 à 766. doi.org/10.1038/ngeo2791

MacDonald A. M., Bell R. A., Kebede S., Azagegn T., Yehualaeshet T., Pichon F., Young M., McKenzie A. A., Lapworth D. J., Black E. et Calow R. C. 2019. « Groundwater and resilience to drought in the Ethiopian highlands ». *Environmental Research Letters*, vol. 14, nº 9, art. 095003. doi.org/10.1088/1748-9326/ab282f

MacDonald A. M., Lark R. M., Taylor R. G., Abiye T., Fallas H. C., Favreau G., Goni I. B., Kebede S., Scanlon B., Sorensen J. P. R., Tijani M., Upton K. A. et West C. 2021. « Mapping groundwater recharge in Africa from ground observations and implications for water security ». *Environmental Research Letters*, vol. 16, nº 3, art. 034012. doi.org/10.1088/1748-9326/abd661

Macdonald D. M. J., Bloomfield J. P., Hughes A. G., MacDonald A. M., Adams B. et McKenzie A. A. 2008. « Improving the understanding of the risk from groundwater flooding in the UK ». *FLOODrisk 2008, European Conference on Flood Risk Management*. Oxford, Royaume-Uni, 30 septembre au 2 octobre 2008. Pays-Bas, CRC Press.

Macdonald D. M. J., Dixon A., Newell A. et Hallaways A. 2012. « Groundwater flooding within an urbanised flood plain ». *Journal of Flood Risk Management*, vol. 5, nº 1, p. 68 à 80. doi.org/10.1111/j.1753-318X.2011.01127.x

Maheshwari B., Varua M., Ward J., Packham R., Chinnasamy P., Dashora Y., Dave S., Soni P., Dillon P., Purohit R., Hakimuddin, Shah T., Oza S., Singh P., Prathapar S., Patel A., Jadeja Y., Thaker B., Kookana R., Grewal H., Yadav K., Mittal H., Chew M. et Rao P. 2014. « The role of transdisciplinary approach and community participation in village scale groundwater management: Insights from Gujarat and Rajasthan, India ». *Water*, vol. 6, nº 11, p. 3386 à 3408. doi.org/10.3390/w6113386

Majumdar D. 2003. « The Blue Baby Syndrome: Nitrate poisoning in humans ». *Resonance*, vol. 8, p. 20 à 30. doi.org/10.1007/BF02840703

Manyi-Loh C., Mamphweli S., Meyer E. et Okoh A. 2018. « Antibiotic use in agriculture and its consequential resistance in environmental sources: Potential public health implications ». *Molecules*, vol. 23, nº 4, article 795. doi.org/10.3390/molecules23040795

Manzano M. et Lambán L. J. 2011. Evaluación de los servicios de los ecosistemas de las aguas subterráneas en España [Évaluation des services écosystémiques liés aux eaux souterraines dans les aquifères espagnols]. *Ecosistemas y biodiversidad para el bienestar humano. Evaluación de los Ecosistemas del Milenio de España* [Les Écosystèmes et la biodiversité au service du bien-être humain. Évaluation des écosystèmes pour le millénaire en Espagne]. Madrid, Fundación Biodiversidad, Ministère espagnol de l'environnement, du milieu rural et de la mer. www.ecomilenio.es/informe-de-resultados-eme/1760 (en espagnol)

Marazuela M. A., Vázquez-Suñé E., Ayora C., García-Gil A. et Palma T. 2019. « Hydrodynamics of salt flat basins: The Salar de Atacama example ». *Science of the Total Environment,* vol. 651, Partie 1, p. 668 à 683. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.190

Marchesini V. A., Fernández R. J. et Jobbágy E. G. 2013. « Salt leaching leads to drier soils in disturbed semiarid woodlands of central Argentina ». *Oecologia, vol.* 171, p. 1003 à 1012. doi.org/10.1007/s00442-012-2457-y

Margat J. et Van der Gun J. 2013. *Groundwater around the World: A Geographical Synopsis*. Boca Raton, Floride, CRC Press.

Maron D. F., Smith T. J. et Nachman K. E. 2013. « Restrictions on antimicrobial use in food animal production: An international regulatory and economic survey ». *Globalization and Health*, vol. 9, nº 48. doi.org/10.1186/1744-8603-9-48

Mas-Pla J. et Menció A. 2019. « Groundwater nitrate pollution and climate change: Learnings from a water balance-based analysis of several aquifers in a western Mediterranean region (Catalonia) ». *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, p. 2184 à 2202. doi.org/10.1007/s11356-018-1859-8

Mateo-Sagasta J. et Burke J. 2010. *Agriculture and Water Quality Interactions: A Global Overview*. SOLAW Background Thematic Report — TR08. Rome, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). www.fao.org/3/bl092e/bl092e.pdf

Matheswaran K., Khadka A., Dhaubanjar S., Bharati L., Kumar S. et Shrestha S. 2019. « Delineation of spring recharge zones using environmental isotopes to support climate-resilient interventions in two mountainous catchments in Far-Western Nepal ». *Hydrogeology Journal*, vol. 27, p. 2181 à 2197. doi.org/10.1007/s10040-019-01973-6

Maven's Notebook. 2015. *Groundwater Problems and Prospects, Part 1: An Overview of Groundwater,* 12 mars 2015. mavensnotebook.com/2015/03/12/groundwater-problems-and-prospects-part-1-an-overview-of-groundwater/

McDonough L. K., Santos I. R., Andersen M. S., O'Carroll D. M., Rutlidge H., Meredith K., Oudone P., Bridgeman J., Gooddy D. C., Sorensen J. P. R., Lapworth D. J., MacDonald A. M., Ward J. et Baker A. 2020. « Changes in global groundwater organic carbon driven by climate change and urbanization ». *Nature Communications*, vol. 11, art. 1279. doi.org/10.1038/s41467-020-14946-1

McGill B. M., Altchenko Y., Hamilton S. K., Kenabatho P. K., Sylvester S. R. et Villholth K. G. 2019. « Complex interactions between climate change, sanitation, and groundwater quality: A case study from Ramotswa, Botswana ». *Hydrogeology Journal*, vol. 27, p. 997 à 1015. doi.org/10.1007/s10040-018-1901-4

McManamay R. A., Griffiths N. A., DeRolph C. R. et Pracheil B. M. 2017. « A synopsis of global mapping of freshwater habitats and biodiversity: Implications for conservation ». L. Hufnagel (éds.), *Pure and Applied Biogeography*, IntechOpen. doi.org/10.5772/intechopen.70296

McPhaden M. J., Santoso A. et Cai, W. (éds.). 2020. *El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate*. Union américaine de géophysique. doi.org/10.1002/9781119548164

McStraw T. C. 2020. *An Open-Source Web-Application for Regional Analysis of GRACE Groundwater Data and Engaging Stakeholders in Groundwater Management.* Thèse de master. Provo, Utah, Université Brigham-Young. scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=9144&context=etd

Mécanisme de concertation du SASS (Système aquifère du Sahara septentrional). 2020. *Les Avantages de la coopération dans le domaine des eaux transfrontières dans le système aquifère du Sahara septentrional*. Note d'orientation. unece.org/fileadmin/DAM/env/water/activities/Benefits_cooperation/FR_NWSAS_Brief_BenefitsTransbWatCoop_2020_Web.pdf

Mechlem K. 2016. « Groundwater governance: The role of legal frameworks at the local and national level — Established practice and emerging trends ». *Water*, vol. 8, nº 8, art. 347. doi.org/10.3390/w8080347

Megdal S. B., Gerlak A.K., Varady R.G. et Ling-Yee H. 2014. « Groundwater governance in the United States: Common priorities and challenges ». *Groundwater*, vol. 53, nº 5, p. 677 à 684. doi.org/10.1111/gwat.12294

Meglioli P. A., Aranibar J. N., Villagra P. E., Alvarez J. A. et Jobbágy E. G. 2013. « Livestock stations as foci of groundwater recharge and nitrate leaching in a sandy desert of the Central Monte, Argentina ». *Ecohydrology,* vol. 7, nº 2, p. 600 à 611. doi.org/10.1002/eco.1381

Meinzen-Dick R. et Nkonya L. 2007. « Understanding legal pluralism in water and land rights: Lessons from Africa and Asia ». B. van Koppen, M. Giordano et J. Butterworth (éds.), *Community-Based Water Law and Water Resource Management Reform in Developing Countries*. Wallingford, Royaume-Uni, CABI (Centre international pour l'agriculture et les biosciences).

Mekonnen M. M. et Gerbens-Leenes W. 2020. « The water footprint of global food production ». *Water,* vol. 12, nº 10, art. 2696. doi.org/10.3390/w12102696

Mekonnen M. M. et Hoekstra A. Y. 2012. « A global assessment of the water footprint of farm animal products ». *Ecosystems*, vol. 15, nº 3, p. 401 à 415. doi.org/10.1007/s10021-011-9517-8

_____. 2016. « Four billion people facing severe water scarcity ». *Science Advances*, vol. 2, nº 2, e1500323. doi.org/10.1126/sciadv.1500323

Michael H. A., Russoniello C. J. et Byron L. A. 2013. « Global assessment of vulnerability to sea-level rise in topography-limited and recharge-limited coastal groundwater systems ». *Water Resources Research*, vol. 49, nº 4, p. 2228 à 2240. doi.org/10.1002/wrcr.20213

Milman A., Bylo K., Gage A. et Blomquist W. 2021. « Groundwater recharge to support wildlife and water users: The Heyborne ponds project, Sedgwick county, Colorado ». *Case Studies in the Environment*, vol. 5, nº 1, art. 1235924. doi.org/10.1525/cse.2021.1235924

Ministère des autorités régionales, de l'environnement et des ressources en eau du Sultanat d'Oman. 2006. *Système d'irrigation aflaj d'Oman*. Inscrit sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO. whc.unesco.org/fr/list/1207/

Ministère indien des ressources en eau. 2012. *National Water Policy (2012)*. Ministère des ressources en eau, Gouvernement de l'Inde. jalshakti-dowr.gov.in/sites/default/files/NWP2012Eng6495132651_1.pdf

_____. 2017. *5th Census of Minor Irrigation Schemes Report.* Ministère des ressources en eau, de la mise en valeur des fleuves et de la régénération du Gange, Gouvernement de l'Inde. jalshakti-dowr.gov.in/sites/default/files/5th-MICensusReport_0.pdf

Ministère japonais de l'environnement/IGES (Institut des stratégies environnementales mondiales). 2018. *WEPA Outlook on Water Environmental Management in Asia 2018.* Tokyo, Ministère japonais de l'Environnement. wepa-db.net/en/publication/2018_outlook/wepa_outlook_report_2018_en.pdf

Misstear B., Banks D. et Clark L. 2017. *Water Wells and Boreholes*. Deuxième édition. Chichester, Royaume-Uni, J. Wiley & Sons.

Moench M. 2004. « Groundwater: The challenge of monitoring and management ». P. Gleick (éd.), *The World's Water 2004-2005: The Biennial Report on Freshwater Resources*. Washington, D.C., Island Press.

Mohan C., Western A. W., Wei Y. et Saft M. 2018. « Predicting groundwater recharge for varying land cover and climate conditions — A global meta-study ». *Hydrology Earth System Sciences*, vol. 22, nº 5, p. 2689 à 2703. doi.org/10.5194/hess-22-2689-2018

Molle F. et Berkoff J. 2007. *Irrigation Water Pricing Policy: The Gap Between Theory and Practice*. Cambridge, Massachussets, Bureau nord-américain de CABI (Centre international pour l'agriculture et les biosciences). doi.org/10.1079/9781845932923.0000

_____. 2009. « Cities vs. agriculture: A review of intersectoral water re-allocation ». *Natural Resources Forum*, vol. 33, nº 1, p. 6 à 18. doi.org/10.1111/j.1477-8947.2009.01204.x

Molle F. et Closas A. 2019. « Why is state-centered groundwater governance largely ineffective? A review ». *WIREs Water*, vol. 7, nº 1, e1395. doi.org/10.1002/wat2.1395

_____. 2020. « Groundwater licensing and its challenges ». *Hydrogeology Journal*, vol. 28, nº 6, p. 1961 à 1974. doi.org/10.1007/s10040-020-02179-x

Mostafaeipour A. 2010. « Historical background, productivity and technical issues of qanats ». *Water History*, vol. 2, p. 61 à 80. doi.org/10.1007/s12685-010-0018-z

Mukherjee A. 2018. « Groundwater of South Asia ». A. Mukherjee (éd.), *Springer Hydrogeology*. Springer Singapore. doi.org/10.1007/978-981-10-3889-1

Mukherji A. 2017. « Managing energy-irrigation nexus: Insights from Karnataka and Punjab states in India ». K. G. Villholth, E. Lopez-Gunn, K. Conti, A. Garrido et J. van der Gun (éds.), *Advances in Groundwater Governance*. Leyde, Pays-Bas, CRC Press/Balkema, p. 289 à 305.

Mukherji A. 2020. « Sustainable groundwater management in India needs a water-energy-food nexus approach ». *Applied Economic Perspectives and Policy*. doi.org/10.1002/aepp.13123

Mukherji A., Das B., Majumdar N., Nayak N. C., Sethi R. R. et Sharma B. R. 2009. « Metering of agricultural power supply in West Bengal, India: Who gains and who loses? » *Energy Policy*, vol. 37, nº 12, p. 5530 à 5539. doi.org/10.1016/j.enpol.2009.08.051

Müller Schmied H., Cáceres D., Eisner S., Flörke M., Herbert C., Niemann C., Peiris T.A., Popat E., Portmann F.T., Reinecke R., Schumacher M., Shadkam S., Telteu C.E., Trautmann T. et Döll P. 2021. « The global water resources and use model WaterGAP v2.2d: Model description and evaluation ». *Geoscientific Model Development*, vol. 14, p. 1037 à 1079. doi.org/10.5194/gmd-14-1037-2021

Murray B. R., Zeppel M. J. B., Hose G. C. et Eamus D. 2003. « Groundwater-dependent ecosystems in Australia: It's more than just water for rivers ». *Ecological Management & Restoration*, vol. 4, nº 2, p. 110 à 113. doi.org/10.1046/j.1442-8903.2003.00144.x

Murray R., Louw D., Van der Merwe B. et Peters I. 2018. « Windhoek, Namibia: from conceptualising to operating and expanding a MAR scheme in a fractured quartzite aquifer for the city's water security ». *Sustainable Water Resources Management*, vol. 4, p. 217 à 223. doi.org/10.1007/s40899-018-0213-0

Myhre G., Alterskjær K., Stjern C. W., Hodnebrog Ø., Marelle L., Samset B. H., Sillmann J., Schaller N., Fischer E., Schulz M. et Stohl A. 2019. « Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming ». *Scientific Reports*, vol. 9, art. 16063. doi.org/10.1038/s41598-019-52277-4

NASA/NDMC (Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace / Centre national pour la mitigation des sécheresses - États-Unis). 2021. *GRACE-based Shallow Groundwater Drought Indicator for 7 June 2021*. NDMC, Université du Nebraska à Lincoln. nasagrace.unl.edu

Nel J., Xu Y., Batelaan O. et Brendonck L. 2009. « Benefit and implementation of groundwater protection zoning in South Africa ». *Water Resources Management,* vol. 23, nº 14, art. 2895. doi.org/10.1007/s11269-009-9415-4

Nelson R. et Quevauviller P. 2016. « Groundwater law: Concepts, approaches and challenges ». A.J. Jakeman, O. Barreteau, R.J. Hunt, J.-D. Rinaudo et A. Ross (éds.), *Integrated Groundwater Management: Concept, Approaches and Challenges*. Cham, Suisse, Springer International Publishing, p. 173 à 196.

Ngowi A. V. F., Wesseling C. et London L. 2012. « Developing countries: Pesticide health impacts ». S. E. Jorgensen (éd.), *Encyclopedia of Environmental Management.* Boca Raton, Floride, CRC Press, p. 573 à 577.

Nicholls R. J., Lincke D., Hinkel J., Brown S., Vafeidis A. T., Meyssignac B., Hanson S. E., Merkens J.-L. et Fang J. 2021. « A global analysis of subsidence, relative sea-level change and coastal flood exposure ». *Nature Climate Change*, vol. 11, p. 338 à 342. doi.org/10.1038/s41558-021-00993-z

Nijsten G-J., Ansems N., Kukurić N. et Aureli A. 2016. *A Multi-Disciplinary Approach and Tools for Comparative and In-Depth Assessments of Transboundary Aquifers*. Document présenté lors de la VACI(Vietnam wAter Cooperation Initiative) de 2016, Hanoï, 3-4 octobre 2016. www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/Nijsten%20et.al_TBA%20assessment%20and%20IMS_VACI2016.pdf

Northey S. A., Mudd G. M., Werner T. T., Haque N. et Yellishetty M. 2019. « Sustainable water management and corporate reporting in mining ». *Water Resources and Industry*, vol. 21, art. 100104. doi.org/10.1016/j.wri.2018.100104

OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques). 2008. *La performance environnementale de l'agriculture dans les pays de l'OCDE depuis 1990*. Paris, Éditions OCDE. doi.org/10.1787/9789264040946-fr

_____. 2010a. *Agricultural Water Pricing: EU and Mexico*. Paris, OCDE. www.oecd.org/eu/45015101.pdf

_____. 2010b. *OECD Horizontal Water Programme — Financing Water Resources Management. Background Notes on Financing Water Resources Management*. www.oecd.org/env/resources/46228672.pdf

_____. 2011. *Guide de la fiscalité environnementale destiné aux décideurs*. doi.org/10.1787/9789264087651-8-fr

_____. 2012a. *Qualité de l'eau et agriculture : Un défi pour les politiques publiques*. Études de l'OCDE sur l'eau. Paris, Éditions OCDE. doi.org/10.1787/9789264121119-fr

_____. 2012b. *A Framework for Financing Water Resources Management*. Études de l'OCDE sur l'eau. Paris, Éditions OCDE. doi.org/10.1787/9789264179820-en

_____. 2016. *Tackling the Challenges of Agricultural Groundwater Use*. mai 2016. www.oecd.org/greengrowth/sustainable-agriculture/Challenges%20of%20groundwater%20use.pdf

_____. 2017a. *Diffuse Pollution, Degraded Waters: Emerging Policy Solutions*. Études de l'OCDE sur l'eau. Paris, Éditions OCDE. doi.org/10.1787/9789264269064-en

_____. 2017b. *Groundwater Allocation: Managing Growing Pressures on Quantity and Quality*. Études de l'OCDE sur l'eau. Paris, Éditions OCDE. doi.org/10.1787/9789264281554-en

_____. 2018. *Financing Water: Investing in Sustainable Growth*. OECD Environment Policy Papers No. 11. Paris, Éditions OCDE. doi.org/10.1787/bf67ec4e-en

_____. 2019a. *Pharmaceutical Residues in Freshwater: Hazards and Policy Responses*. Études de l'OCDE sur l'eau. Paris, Éditions OCDE. doi.org/10.1787/c936f42d-en

_____. 2019b. *Making Blended Finance Work for Water and Sanitation: Unlocking Commercial Finance for SDG 6*. Études de l'OCDE sur l'eau. Paris, Éditions OCDE. doi.org/10.1787/5efc8950-en

_____. 2021. *Water Governance in Peru.* Études de l'OCDE sur l'eau. Paris, Éditions OCDE. doi.org/10.1787/568847b5-en

_____. n.d. *Inventaires des émissions et des transferts de matières polluantes*. Site web de l'OCDE. www.oecd.org/fr/securitechimique/inventairesdesemissionsetdestransfertsdematierespolluantes/

Ochieng G. M., Seanego E. S. et Nkwonta O. I. 2010. « Impacts of mining on water resources in South Africa: A review ». *Scientific Research and Essays*, vol. 5, nº 22, p. 3351 à 3357.

OEA (Organisation des États américains). 2009. *Aquífero Guarani: programa estratégico de ação = Acuífero Guaraní: programa estratégico de acción* [Aquifère Guarani : Plan d'action stratégique]. OEA (en portugais et en espagnol)

Organisation internationale des migrations (OIM). 2019. *Skyscraper-Depth Well brings Clean Water to Rohingya Refugees*. Articles et communiqués de presse, 17 mai 2019. reliefweb.int/report/bangladesh/skyscraper-depth-well-brings-clean-water-rohingya-refugees

Oiro S., Comte J.-C., Soulsby C., MacDonald A. M. et Mwakamba C. 2020. « Depletion of groundwater resources under rapid urbanisation in Africa: Recent and future trends in the Nairobi Aquifer System, Kenya ». *Hydrogeology Journal*, vol. 28, p. 2635 à 2656. doi.org/10.1007/s10040-020-02236-5

Olago D., Marshall M., Wandiga S. O., Opondo M., Yanda P. Z., Kangalawe R., Githeko A., Downs T., Opere A., Kabumbuli R., Kirumira E., Ogallo L., Mugambi P., Apindi E., Githui F., Kathuri J., Olaka L., Sigalla R., Nanyunja R., Baguma T. et Achola P. 2007. « Climatic, socio-economic, and health factors affecting human vulnerability to cholera in the Lake Victoria basin, East Africa ». *Ambio*, vol. 36, nº 4, p. 350 à 358. doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[350:csahfa]2.0.co;2

Olivier D. W. et Xu Y. 2019. « Making effective use of groundwater to avoid another water-supply crisis in Cape Town, South Africa ». *Hydrogeology Journal*, vol. 27, p. 823 à 826. doi.org/10.1007/s10040-018-1893-0

Olson D. M. et Dinerstein E. 2002. « The Global 200: Priority ecoregions for global conservation ». *Annals of the Missouri Botanical Garden*, vol. 89, nº 2, p. 199 à 224. doi.org/10.2307/3298564

Oluwasanya G., Smith J. et Carter R. 2011. « Self-supply systems: Urban dug wells in Abeokuta, Nigeria ». *Water Supply*, vol. 11, nº 2, p. 172 à 178. doi.org/10.2166/ws.2011.026

OMS (Organisation mondiale de la Santé). 2018. *Rejets chimiques causés par des phénomènes et catastrophes naturels — Informations pour les autorités de santé publique*. Genève, OMS. Licence : CC BY-NC-SA 3.0 IGO. apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/330908/9789242513394-fre.pdf

_____. 2019. *Discussion Paper: Climate, Sanitation and Health*. Version préliminaire juillet 2019. OMS. www.who.int/water_sanitation_health/sanitation-waste/sanitation/sanitation-and-climate-change20190813.pdf

OMS/UNICEF (Organisation mondiale de la Santé/Fonds des Nations Unies pour l'enfance). 2017. *Progrès en matière d'eau, d'assainissement et d'hygiène : mise à jour 2017 et évaluation des ODD*. Genève, OMS/UNICEF. data.unicef.org/resources/progress-drinking-water-sanitation-hygiene-2017-update-sdg-baselines/#

_____. 2021. *Progrès en matière d'eau potable, d'assainissement et d'hygiène des ménages, 2000-2020: Cinq ans après l'adoption des ODD*. Genève, OMS/UNICEF. data.unicef.org/resources/progress-on-household-drinking-water-sanitation-and-hygiene-2000-2020/

ONUDI (Organisation des Nations Unies pour le développement industriel). Non publié. Renseignements obtenus auprès de Christian Susan (spécialiste du développement industriel, ONUDI) en 2021.

ONUDI/Groupe de la Banque mondiale/GIZ (Organisation des Nations Unies pour le développement industriel/Groupe de la Banque mondiale/Agence allemande de coopération internationale). 2021. *An International Framework for Eco-Industrial Parks, Version 2.0*. Washington, D.C., Banque mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35110

ONU-Eau. 2021. *Summary Progress Update 2021 — SDG 6 — water and sanitation for all*. Version : juillet 2021. Genève, Suisse. www.unwater.org/app/uploads/2021/12/SDG-6-Summary-Progress-Update-2021_Version-July-2021a.pdf

Opie S., Taylor R. G., Brierley C.M., Shamsudduha M. et Cuthbert M. O. 2020. « Climate-groundwater dynamics inferred from GRACE and the role of hydraulic memory ». *Earth System Dynamics*, vol. 11, p. 775 à 791. doi.org/10.5194/esd-11-775-2020

Organisation des Nations Unies. 1997. *Convention sur le droit relatif aux utilisations des cours d'eau internationaux à des fins autres que la navigation*. Organisation des Nations Unies. treaties.un.org/doc/Treaties/1998/09/19980925%2006-30%20PM/Ch_XXVII_12p.pdf

_____. 2018. *Rapport de synthèse 2018 sur l'objectif de développement durable 6 relatif à l'eau et à l'assainissement*. New York, Organisation des Nations Unies. www.unwater.org/app/uploads/2018/05/UN-Water_SDG6_Synthesis_Report_2018_Executive_Summary_FR.pdf

_____. 2021. *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2021 : La Valeur de l'eau*. Paris, UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375725

Ortigara A. R. C., Kay M. et Uhlenbrook S. 2018. « A review of the SDG 6 synthesis report 2018 from an education, training, and research perspective ». *Water*, vol. 10, nº 10, art. 1353. doi.org/10.3390/w10101353

OTCA (Organisation du traité de coopération amazonienne). 2018. *Programa de Acciones Estratégicas : Estrategia Regional para la Gestión Integrada de los Recursos, Hídricos de la Cuenca Amazónica* [Programme d'action stratégique : stratégie régionale pour la gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin de l'Amazone]. Brasília, OTCA. otca.org/wp-content/uploads/2021/02/Programa-de-Acciones-Estrategicas-PAE.pdf (en espagnol)

Oude Essink G. H. P., Van Baaren E. S. et De Louw P. G. B. 2010. « Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modelling study in The Netherlands ». *Water Resources Research*, vol. 46, nº 10, W00F04. doi.org/10.1029/2009WR008719

Page D., Bekele E., Vanderzalm J. et Sidhu J. 2018. « Managed Aquifer Recharge (MAR) in sustainable urban water management ». *Water*, vol. 10, nº 3, art. 239. doi.org/10.3390/w10030239

Pandit C. et Biswas A. K. 2019. « India's National Water Policy: 'Feel good' document, nothing more ». *International Journal of Water Resources Development*, vol. 35, nº 6, p. 1015 à 1028. doi.org/10.1080/07900627.2019.1576509

Parlement européen/Conseil de l'Union européenne. 2000. Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil européen du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. *Journal officiel des communautés européennes*, L. 327/1. eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj?locale=fr

_____. 2006. Directive 2006/118/CE du Parlement européen et du Conseil européen du 12 décembre 2006 sur la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration. *Journal officiel de l'Union européenne*, L. 372/19. eur-lex.europa.eu/eli/dir/2006/118/oj

Pascolini-Campbell M., Reager J. T., Chandanpurkar H. A. et Rodell M. 2021. « A 10 per cent increase in global land evapotranspiration from 2003 to 2019 ». *Nature*, vol. 593, p. 543 à 547. doi.org/10.1038/s41586-021-03503-5

Pavelic P., Giordano M., Keraita B., Ramesh V. et Rao T. (éds.). 2012. *Groundwater Availability and Use in Sub-Saharan Africa: A Review of 15 Countries*. Colombo, IWMI (Institut international de gestion des ressources en eau). doi.org/10.5337/2012.213

Pavelic P., Villholth K. G., Shu Y., Rebelo L. M. et Smakhtin V. 2013. « Smallholder groundwater irrigation in Sub-Saharan Africa: Country-level estimates of development potential ». *Water International*, vol. 38, nº 4, p. 392 à 407. doi.org/10.1080/02508060.2013.819601

Peal A., Evans B., Ahilan S., Ban R., Blackett I., Hawkins P., Schoebitz L., Scott R., Sleigh A., Strande L. et Veses O. 2020. « Estimating safely-managed sanitation in urban areas: Lessons learned for a global implementation of excreta-flow diagrams ». *Frontiers in Environmental Science*, vol. 8, nº 1. doi.org/10.3389/fenvs.2020.00001

Petersen-Perlman J. D., Megdal S. B., Gerlak A. K., Wireman M., Zuniga-Teran A. A. et Varady R. G. 2018. « Critical issues affecting groundwater quality governance and management in the United States ». *Water*, vol. 10, nº 6, art. 735. doi.org/10.3390/w10060735

Pimentel D. 2005. « Environmental and economic costs of the application of pesticides primarily in the United States ». *Environment, Development and Sustainability*, vol. 7, p. 229 à 252. doi.org/10.1007/s10668-005-7314-2

Plummer J. 2012. *Diagnosing Corruption in Ethiopia: Perceptions, Realities, and the Way Forward for Key Sectors.* Directions in Development-Public Sector Governance. Washington, D.C., Banque mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/13091

PNUD (Programme des Nations Unies pour le développement)/Ministère de l'énergie et de l'eau du Liban. 2014. *Assessment of Groundwater Resources of Lebanon*. www.lb.undp.org/content/lebanon/en/home/library/environment_energy/assessment-of-groundwater-resources-of-lebanon.html

PNUE (Programme des Nations Unies pour l'environnement). 2019. *Global Environment Outlook Geo 6: Healthy Planet, Healthy People.* Cambridge University Press. doi.org/10.1017/9781108627146

_____. 2020. Document d'orientation technique nº 3 relatif à l'indicateur 6.3.2 des ODD : surveillance et établissement de rapports pour les eaux souterraines. communities.unep.org/download/attachments/32407814/PR_CDC_GEMI2_TechDoc3_Groundwaters_20200402-TR.pdf?version=1&modificationDate=1595582832574&api=v2

Polemio M. et Walraevens K. 2019. « Recent research results on groundwater resources and saltwater intrusion in a changing environment ». *Water*, vol. 11, nº 6, art. 1118. doi.org/10.3390/w11061118

Post V. E. A., Groen J., Kooi H., Person M., Ge S. et Edmunds W. M. 2013. « Offshore fresh groundwater reserves as a global phenomenon ». *Nature*, vol. 504, p. 71 à 78. doi.org/10.1038/nature12858

Powell O. et Fensham R. 2016. « The history and fate of the Nubian Sandstone Aquifer springs in the oasis depressions of the Western Desert, Egypt ». *Hydrogeology Journal*, vol. 24, p. 395 à 406. doi.org/10.1007/s10040-015-1335-1

Prestinaci F., Pezzotti P. et Pantosti A. 2015. « Antimicrobial resistance: A global multifaceted phenomenon ». *Pathogens and Global Health*, vol. 109, nº 7, p. 309 à 318. doi.org/10.1179/2047773215Y.0000000030

Prinet C., Thibeau S., Lescanne M. et Monne J. 2013. « Lacq-Rousse CO_2 capture and storage demonstration pilot: Lessons learnt from two and a half years monitoring ». *Energy Procedia*, vol. 37, p. 3610 à 3620. doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.254

Prosser I., Wolf L. et Littleboy A. 2011. « Water in mining and industry ». I. Prosser (éd.), *Water: Science and Solutions for Australia*. Collingwood, Australie, CSIRO Publishing. www.publish.csiro.au/book/6557

Puri S. et Villholth K. G. 2018. « Governance and management of transboundary aquifers ». K. G. Villholth, E. Lopez-Gunn, K. Conti, A. Garrido et J. van der Gun (éds.), *Advances in Groundwater Governance*. Leyde, Pays-Bas, CRC Press/Balkema, p. 367 à 388.

_____. 2021. « I say 'aquifer' and she says 'groundwater' … Let's call the whole thing off… (with apologies to Ella Fitzgerald & Satchmo) ». *Water Alternatives Forum*, 15 mai 2021. www.water-alternatives.org/index.php/blog/aquifer

Q

Qadir M., Quillérou E., Nangia V., Murtaza G., Singh M., Thomas R. J., Drechsel P. et Noble A. D. 2014. « Economics of salt-induced land degradation and restoration ». *Natural Resources Forum*, vol. 38, nº 4, p. 282 à 295. doi.org/10.1111/1477-8947.12054

Quevauviller P., Batelaan O. et Hunt R. J. 2016. « Groundwater regulation and integrated water planning ». A. J. Jakeman, O. Barreteau, R. Hunt, J.-D. Rinaudo et A. Ross (éds.), *Integrated Groundwater Management: Concepts, Approaches and Challenges*. Cham, Suisse, Springer International Publishing.

Qureshi A. S. 2020. « Groundwater governance in Pakistan: From colossal development to neglected management ». *Water*, vol. 12, nº 11, art. 3017. doi.org/10.3390/w12113017

R

Rajan A., Ghosh K. et Shah A. 2020. « Carbon footprint of India's groundwater irrigation ». *Carbon Management*, vol. 11, nº 3, p. 265 à 280. doi.org/10.1080/17583004.2020.1750265

Rajkumar Y. et Xu Y. 2011. « Protection of borehole water quality in Sub-Saharan Africa using minimum safe distances and zonal protection ». *Water Resources Management*, vol. 25, nº 13, p. 3413 à 3425. doi.org/10.1007/s11269-011-9862-6

Rathay S. Y., Allen D. M. et Kirste D. 2018. « Response of a fractured bedrock aquifer to recharge from heavy rainfall events ». *Journal of Hydrology*, vol. 561, p. 1048 à 1062. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.042

Ray C. (éd.). 2020. *Sacred Waters: A Cross-Cultural Compendium of Hallowed Springs and Holy Wells*. Oxon, Royaume-Uni, Routledge.

Re V. 2015. « Incorporating the social dimension into hydrogeochemical investigations for rural development: The Bir Al-Nas approach for socio-hydrogeology ». *Hydrogeology Journal*, vol. 23, p. 1293 à 1304. doi.org/10.1007/s10040-015-1284-8

Re V. et Misstear B. 2018. « Education and capacity development for groundwater resources management ». K. G. Villholth, E. Lopez-Gunn, K. Conti, A. Garrido et J. van der Gun (éds.), *Advances in Groundwater Governance*. Leyde, Pays-Bas, CRC Press/Taylor & Francis, p. 212 à 230.

Reinecke R., Müller Schmied H., Trautmann T., Andersen L. S., Burek P., Flörke M., Gosling S. N., Grillakis M., Hanasaki N., Koutroulis A., Pokhrel Y., Thiery W., Wada Y., Yusuke S. et Döll P. 2021. « Uncertainty of simulated groundwater recharge at different global warming levels: A global-scale multi-model ensemble study ». *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 25, p. 787 à 810. doi.org/10.5194/hess-25-787-2021

République d'Afrique du Sud. 2010. *Groundwater Strategy 2010*. Département des affaires de l'eau, République d'Afrique du Sud. www.dwa.gov.za/Groundwater/Documents/GSDocument%20FINAL%202010_MedRes.pdf

République populaire de Chine. 1988. *Decree of the President of the People's Republic of China Order No. 61: "Water Law of the People's Republic of China"*. extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/chn1317E.pdf

Reynolds E. R. C. et Thompson F. B. (éds.). 1988. *Forests, Climate, and Hydrology: Regional Impacts*. Tokyo, Université des Nations Unies (UNU). archive.unu.edu/unupress/unupbooks/80635e/80635E00.htm

Rhodes S. L. et Wheeler S. E. 1996. « Rural electrification and irrigation in the U.S. High Plains ». *Journal of Rural Studies*, vol. 12, nº 3, p. 311 à 317. doi.org/10.1016/0743-0167(96)00005-8

Richey A. S., Thomas B. F., Lo M.-H., Reager J. T., Famiglietti J. S., Voss K., Swenson S. et Rodell M. 2015. « Quantifying renewable groundwater stress with GRACE ». *Water Resources Research*, vol. 51, nº 7, p. 5217 à 5238. doi.org/10.1002/2015WR017349

Riedel T. 2019. « Temperature-associated changes in groundwater quality ». *Journal of Hydrology*, vol. 572, p. 206 à 212. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.059

Ringrose P. S. 2018. « The CCS hub in Norway: Some insights from 22 years of saline aquifer storage ». *Energy Procedia*, vol. 146, p. 166 à 172. doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.021

Ritchie H. et Roser M. 2017. *Water Use and Stress*. Our World In Data. ourworldindata.org/water-use-stress (consulté en mars 2021)

Rivera A. (éd.). 2014. *Canada's Groundwater Resources*. Markham, Ontario, Fitzhenry & Whiteside.

_____. 2015. « Transboundary aquifers along the Canada-USA border: Science, policy and social issues ». *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 4, partie B, p. 623 à 643. doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.09.006

_____. 2020. *The State of Knowledge and Shared Management of Transboundary Aquifers at the Global Scale.* Discours principal du Sommet de l'Association nationale des eaux souterraines des États-Unis, 8 décembre 2020.

Rodell M., Famiglietti J. S., Wiese D. N., Reager J. T., Beaudoing H. K., Landerer F. W. et Lo M.-H. 2018. « Emerging trends in global freshwater availability ». *Nature*, vol. 557, p. 651 à 659. doi.org/10.1038/s41586-018-0123-1

Rohde M. M., Froend R. et Howard J. 2017. « A global synthesis of managing groundwater dependent ecosystems under sustainable groundwater policy ». *Groundwater*, vol. 55, nº 3, p. 293 à 301. doi.org/10.1111/gwat.12511

Ross A. 2016. « Groundwater governance in Australia, the European Union and the Western USA ». A. J. Jakeman, O. Barreteau, R. J. Hunt, J.-D. Rinaudo et A. Ross (éds.), *Integrated Groundwater Management: Concept, Approaches and Challenges*. Cham, Suisse, Springer International Publishing, p. 145 à 171.

Royaume des Tonga. 2020. *Tonga's Second Nationally Determined Contribution (NDC).* Soumission dans le cadre de l'Accord de Paris, décembre 2020. www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Tonga%20Second/Tonga%27s%20Second%20NDC.pdf

Royaume des Tonga/Groupe de la Banque mondiale/FIDA (Fonds international de développement agricole)/PNUD (Programme des Nations Unies pour le développement). 2016. *Tonga Agriculture Sector Plan 2016-2020*. www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC168836/

Ruz C., Samaniego L. et Rangel Medina M. 2020. « Estado actual del monitoreo de agua subterránea en América Latina e introducción al programa GGMN » [État actuel de la surveillance des eaux souterraines en Amérique latine et introduction au Réseau mondial de surveillance des eaux souterraines]. *Revista Aqua-LAC*, vol. 12, nº 1. www.un-igrac.org/es/resource/estado-actual-del-monitoreo-de-agua-subterranea-en-america-latina-e-introduccion-al (en espagnol)

RVO. 2015. *Regeling nationale EZ subsidies — Risico's dekken voor Aardwarmte. Handleiding: Garantieregeling tegen het risico van misboring* [Réglementation pour les subventions des affaires économiques nationales — Couverture des risques de la chaleur géothermique. Manuel : Système de garantie contre le risque d'erreurs de forage]. Ruremonde, Pays-Bas, Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. www.rvo.nl/sites/default/files/Handleiding_SEI%20RNES%20risico%20aardwarmte%2014_09_2015.pdf (en néerlandais)

SADC-GMI/IGRAC/IGS (Institut de gestion des eaux souterraines de la Communauté de développement de l'Afrique australe/Centre international d'évaluation des ressources en eaux souterraines/Institute for Groundwater Studies). 2019a. *State of Groundwater Data Collection and Data Management in SADC Member States*. sadc-gmi.org/wp-content/uploads/2020/03/State-of-GW-data-in-SADC_2019.pdf

_____. 2019b. *SADC Framework for Groundwater Data Collection and Management*. Bloemfontein, SADC-GMI. www.un-igrac.org/resource/sadc-framework-groundwater-data-collection-and-management

Salman S. M. A. et Bradlow D. 2006. *Regulatory Frameworks for Water Resources Management: A Comparative Study*. Washington, D.C., Banque mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/7054

Santos I. R., Chen X., Lecher A. L., Sawyer A. H., Moosdorf N., Rodellas V., Tamborski J., Cho H.-M., Dimova N., Sugimoto R., Bonaglia S., Li H., Hajati M.-C. et Li L. 2021. « Submarine groundwater discharge impacts on coastal nutrient biogeochemistry ». *Nature Reviews Earth & Environment*, vol. 2, p. 307 à 323. doi.org/10.1038/s43017-021-00152-0

Scanlon B. R., Healy R. W. et Cook P. G. 2002. « Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge ». *Hydrogeology Journal*, vol. 10, p. 18 à 39. doi.org/10.1007/s10040-001-0176-2

Scanlon B. R., Levitt D. G., Reedy R. C., Keese K. E., Sully M. J. 2005. « Ecological controls on water-cycle response to climate variability in deserts ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 102, nº 17, p. 6033 à 6038. doi.org/10.1073/pnas.0408571102

Scanlon B. R., Keese K. E., Flint A. L., Gaye C. B., Edmunds W. M. et Simmers I. 2006. « Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions ». *Hydrological Processes*, vol. 20, nº 15, p. 3335 à 3370. doi.org/10.1002/hyp.6335

Scanlon B. R., Faunt C.C., Longuevergne L., Reedy R. C., Alley W. M., McGuire V. L. et McMahon P. B. 2012a. « Groundwater depletion and sustainability of irrigation in the US High Plains and Central Valley ». *PNAS*, vol. 109, nº 24, p. 9320 à 9325. doi.org/10.1073/pnas.1200311109

Scanlon B. R., Longuevergne L. et Long D. 2012b. « Ground referencing GRACE satellite estimates of groundwater storage changes in the California Central Valley, USA ». *Water Resources Research*, vol. 48, nº 4, W04520. doi.org/10.1029/2011WR011312

Scanlon B. R., Reedy R. C., Faunt C. C., Pool D et Uhlman K. 2016. « Enhancing drought resilience with conjunctive use and managed aquifer recharge in California and Arizona ». *Environmental Research Letters*, vol. 11, nº 3, p. 1 à 15. doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/035013

Schneider P. et Asch F. 2020. « Rice production and food security in Asian Mega deltas — A review on characteristics, vulnerabilities and agricultural adaptation options to cope with climate change ». *Journal of Agronomy and Crop Sciences*, vol. 206, nº 4, p. 491 à 503. doi.org/10.1111/jac.12415

Schoengold K. et Zilberman D. 2007. « The economics of water, irrigation, and development ». *Handbook of Agricultural Economics*, vol. 3, p. 2933 à 2977. doi.org/10.1016/S1574-0072(06)03058-1

Schreinemachers P. et Tipraqsa P. 2012. « Agricultural pesticides and land use intensification in high, middle and low income countries ». *Food Policy*, vol. 37, nº 6, p. 616 à 626. doi.org/10.1016/j.foodpol.2012.06.003

Schulze-Makuch D. 2005. « Longitudinal dispersivity data and implications for scaling behavior ». *Groundwater*, vol. 43, nº 3, p. 443 à 456. doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.0051.x

Scott C. A. 2013. « Electricity for groundwater use: Constraints and opportunities for adaptive response to climate change ». *Environmental Research Letters*, vol. 8, nº3, art. 035005. doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/035005

Scott C. A. et Sharma B. 2010. « Energy supply and the expansion of groundwater irrigation in the Indus-Ganges Basin ». *International Journal of River Basin Management*, vol. 7, nº 2, p. 119 à 124. doi.org/10.1080/15715124.2009.9635374

Secrétariat de la Convention de Ramsar. 2010. *Gestion des eaux souterraines : Lignes directrices pour la gestion des eaux souterraines en vue de maintenir les caractéristiques écologiques des zones humides*. Manuels Ramsar, 4e édition, vol. 11. Gland, Suisse, Secrétariat de la Convention de Ramsar. www.ramsar.org/sites/default/files/documents/pdf/lib/hbk4-11fr.pdf

_____. 2013. *Le Manuel de la Convention de Ramsar : Guide de la Convention sur les zones humides (Ramsar, Iran, 1971)*, 6e édition. Gland, Suisse, Secrétariat de la Convention de Ramsar. www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/manual6-2013-fr.pdf

_____. 2018. *Perspectives mondiales des zones humides : l'état mondial des zones humides et de leurs services à l'humanité 2018*. Gland, Suisse, Secrétariat de la Convention de Ramsar. www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/gwo_f.pdf

Seddon D., Kashaigili J. J., Taylor R. G., Cuthbert M. O., Mwihumbo C. et MacDonald A. M. 2021. « Focused groundwater recharge in a tropical dryland: Empirical evidence from central, semi-arid Tanzania ». *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 37, art. 100919. doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100919

Şen Z., Al Sefry S., Al Ghamdi S., Ashi W. et Bardi W. 2013. « Strategic groundwater resources planning in arid regions ». *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 6, p. 4363 à 4375. doi.org/10.1007/s12517-012-0701-8

Service d'information sur les Sites Ramsar. n.d. Site web du Service d'information sur les Sites Ramsar. rsis.ramsar.org/ (consulté le 15 mai 2021)

SFI (Société financière internationale). 2014. *Water, Mining and Communities: Creating Shared Value through Sustainable Water Management*. Version préliminaire pour discussion. commdev.org/publications/water-mining-and-communities/

Shah T. 2007. « The groundwater economy of South Asia: An assessment of size, significance and socio-ecological impacts ». M. Giordano et K. G. Villholth (éds.), *The Agricultural Groundwater Revolution: Opportunities and Threats to Development*. Wallingford, Royaume-Uni, CABI (Centre international pour l'agriculture et les biosciences). p. 7 à 36. cgspace.cgiar.org/handle/10568/36474

Shah T. 2009. *Taming the Anarchy: Groundwater Governance in South Asia*. New Delhi, Routledge.

Shah T., Bhatt S., Shah R. K. et Talati J. 2008. « Groundwater governance through electricity supply management: Assessing an innovative intervention in Gujarat, Western India ». *Agricultural Water Management*, vol. 95, nº 11, p. 1233 à 1242. doi.org/10.1016/j.agwat.2008.04.006

Shah T., Burke J., Villholth K. G., Angelica M., Custodio E., Daibes F., Hoogesteger J., Giordano M., Girman J., Van der Gun J., Kendy E., Kijne J., Llamas R., Masiyandima M., Margat J., Marin L., Peck J., Rozelle S., Sharma B. R., Vincent L. et Wang J. 2007. « Groundwater: A global assessment of scale and significance. Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture ». D. Molden (éds.), *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. Londres/Colombo, Earthscan/Institut international de gestion des ressources en eaux (IWMI), p. 395 à 423.

Shah T., Darghouth S. et Dinar A. 2006. *Conjunctive Use of Groundwater and Surface Water.* Agricultural and Rural Development Notes, No. 6. Washington, D.C., Banque mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/9641

Shah T., Giordano M. et Mukherji A. 2012. « Political economy of the energy-groundwater nexus in India: Exploring issues and assessing policy options ». *Hydrogeology Journal*, vol. 20, nº 5, p. 995 à 1006. doi.org/10.1007/s10040-011-0816-0

Shah T., Rajan A., Rai G. P., Verma S. et Durga N. 2018. « Solar pumps and South Asia's energy-groundwater nexus: Exploring implications and reimagining its future ». *Environmental Research Letters*, vol. 13, nº 11, art. 115003. doi.org/10.1088/1748-9326/aae53f

Shah T., Roy A. D., Qureshi A. S. et Wang J. 2003. « Sustaining Asia's groundwater boom: An overview of issues and evidence ». *Natural Resources Forum*, vol. 27, nº 2, p. 130 à 141. doi.org/10.1111/1477-8947.00048

Shahid S. A., Zaman M. et Heng L. 2018. « Soil salinity: Historical perspectives and a world overview of the problem ». M. Zaman, S. A. Shahid et L. Heng, *Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques*. Cham, Suisse, Springer Open, p. 43 à 53. doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3_2

Shamsudduha M. et Taylor R. G. 2020. « Groundwater storage dynamics in the world's large aquifer systems from GRACE: Uncertainty and role of extreme precipitation ». *Earth System Dynamics*, vol. 11, nº 3, p. 755 à 775. doi.org/10.5194/esd-11-755-2020

Shamsudduha M., Taylor R. G., Jones D., Longuevergne L., Owor M. et Tindimugaya C. 2017. « Recent changes in terrestrial water storage in the Upper Nile Basin: An evaluation of commonly used gridded GRACE products ». *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 21, nº 9, p. 4533 à 4549. doi.org/10.5194/hess-21-4533-2017

Shamsudduha M., Joseph G., Haque S. S., Khan M. R., Zahid A. et Ahmed K. M. U. 2020. « Multi-hazard groundwater risks to water supply from shallow depths: Challenges to achieving the Sustainable Development Goals in Bangladesh ». *Exposure and Health*, vol. 12, p. 657 à 667. doi.org/10.1007/s12403-019-00325-9

Shao W., Zhou J., Liu J., Zhang H., Wang J., Xiang C., Yang G. et Tang Y. 2017. « An effect analysis of comprehensive treatment of groundwater over-exploitation in Cheng'an County, Hebei Province, China ». *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 14, nº 1, art. 41. doi.org/10.3390/ijerph14010041

Sharaky A. M., El Abd E. S. A. et Shanab E. F. 2018. « Groundwater assessment for agricultural irrigation in Toshka area, Western Desert, Egypt ». A. M. Negm (éd.), *Conventional Water Resources and Agriculture in Egypt*. *The Handbook of Environmental Chemistry*, vol. 74, Cham, Suisse, Springer International Publishing, p. 347 à 388. doi.org/10.1007/698_2017_124

Sharjah Electricity and Water Authority. 2015. *First Operational Aquifer Storage and Recovery System (ASR) Nizwa Site Sharjah Emirates U.A.E*. www.slideshare.net/NathanLopez2/asrsharjah20091214presentation

Sharma A., Kumar V., Shahzad B., Tanveer M., Singh Sidhu G. P., Handa N., Kohli S. K., Yadav P., Bali A. S., Parihar R. D., Dar O. I., Singh K., Jasrotia S., Bakshi P., Ramakrishnan M., Kumar S., Bhardwaj R. et Thukral A. K. 2019. « Worldwide pesticide usage and its impacts on ecosystem ». *SN Applied Sciences,* vol. 1, art. 1446. doi.org/10.1007/s42452-019-1485-1

Shi X., Qin T., Nie H., Weng B. et He S. 2019. « Changes in major global river discharges directed into the ocean ». *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 16, nº 8, art. 1469. doi.org/10.3390/ijerph16081469

Shiklomanov I. A. et Rodda J. 2003. *World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century*. Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press.

Sidhu B. S., Kandlikar M. et Ramankutty N. 2020. « Power tariffs for groundwater irrigation in India: A comparative analysis of the environmental, equity, and economic tradeoffs ». *World Development*, vol. 128, art. 104836. doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.104836

Siebert S., Burke J., Faures J. M., Frenken K., Hoogeveen J., Döll P. et Portmann F. T. 2010. « Groundwater use for irrigation — a global inventory ». *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 14, nº 10, p. 1863 à 1880. doi.org/10.5194/hess-14-1863-2010

Siebert S., Henrich V., Frenken K. et Burke J. 2013. *Update of the Digital Global Map of Irrigation Areas (GMIA) to Version 5*. Bonn, Allemagne, Institute of Crop Science and Resource Conservation, Université rhénane Frédéric-Guillaume de Bonn. www.fao.org/3/I9261EN/i9261en.pdf

Sindico F., Hirata R. et Manganelli A. 2018. « The Guarani Aquifer System: From a Beacon of hope to a question mark in the governance of transboundary aquifers ». *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 20, p. 49 à 59. doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.04.008

Singh A. 2021. « Soil salinization management for sustainable development: A review ». *Journal of Environmental Management,* vol. 277, art. 111383. doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111383

Small E. E. 2005. « Climatic controls on diffuse groundwater recharge in semiarid environments of the southwestern United States ». *Water Resources Research*, vol. 41, W04012.

Smilovic M., Gleeson T. et Siebert S. 2015. « The limits of increasing food production with irrigation in India ». *Food Security*, vol. 7, p. 835 à 856. doi.org/10.1007/s12571-015-0477-2

Smith B. L. 2003. *Public Policy and Public Participation: Engaging Citizens and Community in the Development of Public Policy*. Élaboré pour le Département de la santé publique et de la population, Bureau régional Atlantique, Santé Canada, Halifax. atrium.lib.uoguelph.ca/xmlui/bitstream/handle/10214/3139/Smith_Public_Policy_and_Public_Participation_Engaging_Citizens_and_Community_in_the_Development_of_Public_Policy_complete.pdf?sequence=24&isAllowed=y

Smith M., Cross K., Paden M. et Laban P. (éds.). 2016. *Spring: Managing Groundwater Sustainably*. Gland, Suisse, UICN (Union internationale pour la conservation de la nature et de ses ressources). doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.WANI.8.en

Smith M. G. et Urpelainen J. 2016. « Rural electrification and groundwater pumps in India: Evidence from the 1982-1999 period ». *Resource and Energy Economics*, vol. 45, p. 31 à 45. doi.org/10.1016/j.reseneeco.2016.05.004

Smolders A. J. P., Lucassen E. C. H. E. T., Bobbink R., Roelofs J. G. M. et Lamers L. P. M. 2010. « How nitrate leaching from agricultural lands provokes phosphate eutrophication in groundwater fed wetlands: The sulphur bridge ». *Biogeochemistry*, vol. 98, p. 1 à 7. doi.org/10.1007/s10533-009-9387-8

Snapp S., Kebede Y., Wollenberg E., Dittmer K. M., Brickman S., Egler C. et Shelton S. 2021. *Agroecology and Climate Change Rapid Evidence Review: Performance of Agroecological Approaches in Low- and Middle- Income Countries*. Wageningue, Pays-Bas, Programme de recherche sur les changements climatiques, l'agriculture et la sécurité alimentaire du GCRAI. hdl.handle.net/10568/113487

Somers L. D., McKenzie J. M., Mark B. G., Lagos P., Ng G.-H. C., Wickert A. D., Yarleque C., Baraër M. et Silva Y. 2019. « Groundwater buffers decreasing glacier melt in an Andean watershed — but not forever ». *Geophysical Research Letters*, vol. 46, nº 22, p. 13016 à 13026. doi.org/10.1029/2019GL084730

Sorensen J. P., Lapworth D. J., Nkhuwa D. C. W., Stuart M. E., Gooddy D. C., Bell R. A., Chirwa M., Kabika J., Liemisa M., Chibesa M. et Pedley S. 2015. « Emerging contaminants in urban groundwater sources in Africa ». *Water Research*, vol. 72, p. 51 à 63. doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.002

Sprenger C., Hartog N., Hernández M., Vilanova E., Grützmacher G., Scheibler F. et Hannappel S. 2017. « Inventory of managed aquifer recharge sites in Europe: Historical development, current situation and perspectives ». *Hydrogeology Journal*, vol. 25, p. 1909 à 1922. doi.org/10.1007/s10040-017-1554-8

Stanton J. S. et Dennehy K. F. 2017. *Brackish Groundwater and its Potential to Augment Freshwater Supplies.* USGS Factsheet 2017-3054. doi.org/10.3133/fs20173054

Statistique Canada. n.d. *Tableau 38-10-0070-01. Prélèvement d'eau dans les industries de l'extraction minière et dans les centrales thermiques d'énergie électrique selon le mois du prélèvement, selon les régions et l'industrie (x 1 000 000).* doi.org/10.25318/3810007001-fra

Stephan R. M. 2011. « The Draft Articles on the Law of Transboundary Aquifers, The process at the UN ILC ». *International Community Law Review*, vol. 13, nº 3, p. 223 à 235. doi.org/10.1163/187197311X582287

Steyl G et Dennis I. 2010. « Recensement des aquifères côtiers en Afrique ». *Hydrogeology Journal*, vol. 18, p. 217 à 225. doi.org/10.1007/s10040-009-0545-9

Stigter T. Y., Nunes J. P., Pisani B., Fakir Y., Hugman R., Li Y., Tomé S., Ribeiro L., Samper J., Oliveira R., Monteiro J. P., Silva A., Tavares P. C. F., Shapouri M., Cancela da Fonseca L. et El Himer H. 2014. « Comparative assessment of climate change and its impacts on three coastal aquifers in the Mediterranean ». *Regional Environmental Change*, vol. 14, p. 41 à 56. doi.org/10.1007/s10113-012-0377-3

Stuyfzand P. J., Smidt E., Zuurbier K. G., Hartog N. et Dawoud M. A. 2017. « Observations and prediction of recovered quality of desalinated seawater in the strategic ASR project in Liwa, Abu Dhabi ». *Water*, vol. 9, nº 3, art.177. doi.org/10.3390/w9030177

Sui Q., Cao X., Lu S., Zhao W., Qiu Z. et Yu G. 2015. « Occurrence, sources and fate of pharmaceuticals and personal care products in the groundwater: A review ». *Emerging Contaminants*, vol. 1, nº 1, p. 14 à 24. doi.org/10.1016/j.emcon.2015.07.001

Sultana S., Ahmed K. M., Mahtab-Ul-Alam S. M., Hasan M., Tuinhof A., Ghosh S. K., Rahman M. S., Ravenscroft P. et Zheng Y. 2015. « Low-cost aquifer storage and recovery: Implications for improving drinking water access for rural communities in coastal Bangladesh ». *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 20, nº 3, B5014007. doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001100

SUNASS (Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento [Agence nationale des services d'assainissement]). 2017. *Nuevo régimen especial de monitoreo y gestión de uso de aguas subterráneas a cargo de las EPS: Metodología, criterios técnico-económicos y procedimiento para determinar la tarifa* [Nouveau dispositif spécial de surveillance et de gestion de l'utilisation des eaux souterraines sous la responsabilité des prestataires de services d'assainissement : méthodologie, critères technico-économiques et méthode de détermination des tarifs]. Lima, SUNASS. hdl.handle.net/20.500.12543/4679 (en espagnol)

Sutton S. 2017. « Trends in Sub-Saharan rural water supply and the essential inclusion of self-supply to achieve 2030 SDG targets ». *Waterlines*, vol. 36, nº 4, p. 339 à 357. www.jstor.org/stable/26600804

Sutton S. et Butterworth J. 2021. *Self-Supply: Filling the Gaps in Public Water-Supply Provision*. Rugby, Royaume-Uni, Practical Action Publishing. doi.org/10.3362/9781780448190

Swanson R. K., Springer A. E., Kreamer D. K., Tobin B. W. et Perry D. M. 2021. « Quantifying the base flow of the Colorado River: Its importance in sustaining perennial flow in northern Arizona and southern Utah (USA) ». *Hydrogeology Journal*, vol. 29, p. 723 à 736. doi.org/10.1007/s10040-020-02260-5

T

Talbot C. J., Bennett E. M., Cassell K., Hanes D. M., Minor E. C., Pearl H., Raymond P. A., Vargas R., Vidon P. G., Wollheim W. et Xenopoulos M. A. 2018. « The impact of flooding on aquatic ecosystem services ». *Biogeochemistry*, vol. 141, p. 439 à 461. doi.org/10.1007/s10533-018-0449-7

Tang F. H. M., Lenzen M., McBratney A. et Maggi F. 2021. « Risk of pesticide pollution at the global scale ». *Nature Geoscience*, vol. 14, p. 206 à 210. doi.org/10.1038/s41561-021-00712-5

Tang H. P.-O. 2013. « Recent development in analysis of persistent organic pollutants under the Stockholm Convention ». *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 45, p. 48 à 66. doi.org/10.1016/j.trac.2013.01.005

Taniguchi M., Burnett W. C., Cable J. E. et Turner J. V. 2002. « Investigation of submarine groundwater discharge ». *Hydrological Process,* vol. 16, nº 11, p. 2115 à 2129. doi.org/10.1002/hyp.1145

Taniguchi M., Uemura T. et Jago-on K. 2007. « Combined effects of urbanization and global warming on subsurface temperature ». *Vadose Zone Journal*, vol. 6, nº 3, p. 591 à 596. doi.org/10.2136/vzj2006.0094

Tarlock A. D. et Robinson J. 2019. *Law of Water Rights and Resources*. Eagan, Minnesota, Clark Boardman Callaghan.

Taylor A., Cocklin C. et Brown R. 2012a. « Fostering environmental champions: A process to build their capacity to drive change ». *Journal of Environmental Management*, vol. 98, p. 84 à 97. doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.12.001

Taylor K. E., Stouffer R. J. et Meehl G. A. 2012b. « An overview of CMIP5 and the experiment design ». *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 93, nº 4, p. 485 à 498. doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1

Taylor R. G., Miret-Gaspa M., Tumwine J., Mileham L., Flynn R., Howard G. et Kulabako R. 2009. « Increased risk of diarrhoeal diseases from climate change: Evidence from communities supplied by groundwater in Uganda ». R. Taylor, C. Tindimugaya, M. Owor et M. Shamsudduha (éds.), *Groundwater and Climate in Africa*. AISH Publication No. 334. Wallingford, Royaume-Uni, IAHS Press, p. 15 à 19.

Taylor R. G., Scanlon B., Döll P., Rodell M., Van Beek R., Wada Y., Longuevergne L., Leblanc M., Famiglietti J. S., Edmunds M., Konikow L., Green T. R., Chen J., Taniguchi M., Bierkens M. F. P., MacDonald A. M., Fan Y., Maxwell R. M., Yechieli Y., Gurdak J. J., Allen D. M., Shamsudduha M., Hiscock K., Yeh P. J.-F., Holman I. et Treidel H. 2013a. « Ground water and climate change ». *Nature Climate Change*, vol. 3, p. 322 à 329. doi.org/10.1038/nclimate1744

Taylor R. G., Todd M. C., Kongola L., Maurice L., Nahozya E., Sanga H. et MacDonald A. M. 2013b. « Evidence of the dependence of groundwater resources on extreme rainfall in East Africa ». *Nature Climate Change*, vol. 3, p. 374 à 378. doi.org/10.1038/nclimate1731

Tekle-Haimanot R., Melaku Z., Kloos H., Reimann C., Fantaye W., Zerihun L. et Bjorvatn K. 2006. « The geographic distribution of fluoride in surface and groundwater in Ethiopia with an emphasis on the Rift Valley ». *Science of the Total Environment*, vol. 367, nº 1, p. 182 à 190. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.11.003

The Nature Conservancy. 2019. *Edwards Aquifer Protection*. Site web de *The Nature Conservancy*. www.nature.org/en-us/about-us/where-we-work/united-states/texas/stories-in-texas/edwards-aquifer-protection/

_____. n.d. Bird Returns program. Site web de The Nature Conservancy. www.scienceforconservation.org/science-in-action/birdreturns

Thorslund J. et Van Vliet M. T. H. 2020. « A global dataset of surface water and groundwater salinity measurements from 1980-2019 ». *Scientific Data*, vol. 7, art. 231. doi.org/10.1038/s41597-020-0562-z

Tincani L., Ross I., Uz Zaman R., Burr P., Mujica-Pereira A. V., Ensink J. et Evans B. 2015. *Regional Assessment of the Operational Sustainability of Water and Sanitation Services in Sub-Saharan Africa.* Improving Value for Money and Sustainability in WASH Programmes (VFM-WASH). Oxford Policy Management. www.researchgate.net/publication/303621168_Regional_assessment_of_the_operational_sustainability_of_water_and_sanitation_services_in_Sub-Saharan_Africa

Tione M. L., Bedano J. C. et Blarasin M. 2016. « Relationships among invertebrate communities and groundwater properties in an unconfined aquifer in Argentina ». *International Journal of Environmental Studies*, vol. 73, nº 5, p. 760 à 777. doi.org/10.1080/00207233.2016.1160650

Torjman S. 2005. *What is Policy?* Ottawa, Institut Caledon des politiques sociales.

Tóth J. 1963. « A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins ». *Journal of Geophysical Research*, vol. 68, nº 16, p. 4795 à 4812. doi.org/10.1029/JZ068i016p04795

Trupp M., Ryan S., Barranco I., Leon D. et Scoby-Smith L. 2021. « Developing the world's largest CO_2 Injection System — a history of the Gorgon Carbon Dioxide Injection System (March 16, 2021) ». *Proceedings of the 15th Greenhouse Gas Control Technologies Conference, 15-18 March 2021*. doi.org/10.2139/ssrn.3815492

Tuinhof A., Foster S., Van Steenbergen F., Talbi A. et Wishart M. 2011. *Appropriate Groundwater Management Policy for Sub-Saharan Africa: In Face of Demographic Pressure and Climatic Variability.* Washington, D.C., Banque mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/27363

UBA (Umweltbundesamt, Ministère autrichien de l'environnement). Non publié. 2021. Communication privée entre Andreas Scheidleder (expert en eaux souterraines, UBA) et l'auteur, basée sur l'expérience de l'EUWI+ (Initiative de l'Union européenne pour l'eau relative aux pays du Partenariat oriental).

UNESCO (Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture). 2001. *Internationally Shared (Transboundary) Aquifer Resources Management: Their Significance and Sustainable Management*. Document cadre. UNESCO-PHI-VI, Série sur les eaux souterraines No. 1, 2001. Paris, UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000124386?posInSet=1&queryId=0b2f0491-ddd6-4668-85dd-e43b1d249129

_____. 2007. *Sistemas acuíferos transfronterizos en las Américas: Evaluación preliminar* [Systèmes aquifères transfrontaliers dans les Amériques : Évaluation préliminaire]. Serie ISARM Américas, n° 1. Montevideo/Washington, D.C., UNESCO/OAE. www.oas.org/dsd/waterresources/projects/ISARM/Publications/ISARMAmericasLibro1(spa).pdf (en espagnol)

_____. 2016. *Trifinio — Estudio de las aguas subterráneas* [Trifinio — Évaluation des eaux souterraines]. Rapport technique. Projet GGRETA — Phase 1 2013-2015. UNESCO. ihp-wins.unesco.org/documents/309/metadata_detail (en espagnol)

_____. n.d. *Delta de l'Okavango*. Site web de la Convention du patrimoine mondial de l'UNESCO. whc.unesco.org/fr/list/1432/documents/

UNESCO/OEA (Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture/Organisation des États américains). 2010. *Aspectos socioeconómicos, ambientales y climáticos de los sistemas acuíferos transfronterizos de las Américas* [Aspects socio-économiques, environnementaux et climatiques des systèmes aquifères transfrontaliers des Amériques]. Série ISARM Américas, n° 3. Montevideo/Washington, D.C., UNESCO/OEA. isarm-americas.org/wp-content/uploads/2019/06/Libro-3.pdf (en espagnol)

UNESCO-PHI (Programme hydrologique intergouvernemental de l'UNESCO). 2000. *Quatorzième session du Comité intergouvernemental*, Paris, 5-10 juin 2000. Rapport final. Paris, UNESCO.

_____. 2009. *Atlas of Transboundary Aquifers: Global Maps, Regional Cooperation and Local Inventories*. Paris, UNESCO. isarm.org/sites/default/files/resources/files/2%20Atlas%20of%20TBA.pdf

UNESCO-PHI/PNUE (Programme hydrologique intergouvernemental de l'UNESCO/Programme des Nations Unies pour l'environnement). 2016. *Transboundary Aquifers and Groundwater Systems of Small Island Developing States: Status and Trends. Summary for Policy Makers*. Nairobi, PNUE (Programme des Nations Unies pour l'environnement). www.un-igrac.org/resource/twap-summary-policy-makers-transboundary-aquifers-and-groundwater-systems-small-island

UNICEF/OMS (Fonds des Nations Unies pour l'enfance/Organisation mondiale de la Santé). 2019. *Progrès en matière d'eau, d'assainissement et d'hygiène des ménages 2000-2017*. New York, UNICEF/OMS. www.unicef.org/reports/progress-on-drinking-water-sanitation-and-hygiene-2019

Ursitti A., Giannoccaro G., Prosperi M., De Meo E. et De Gennaro B. C. 2018. « The magnitude and cost of groundwater metering and control in agriculture ». *Water*, vol. 10, nº 3, art. 344. doi.org/10.3390/w10030344

US EPA (Agence des États-Unis pour la protection de l'environnement). 1996. *Manual: Best Management Practices for Pollution Prevention in the Textile Industry*. Cincinnati, Ohio, US EPA. www.epa.gov/eg/best-management-practices-pollution-prevention-textile-industry-manual

USGS (Service géologique des États-Unis). n.d. *Groundwater Use in the United States*. www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/groundwater-use-united-states?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects

UTI (Union internationale des télécommunications). 2010. *ICT as an Enabler for Smart Water Management*. ITU-T Technology Watch Report. Genève, UTI. www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/23/01/T23010000100003PDFE.pdf

V

Van der Gun J. 2018. « Data, information, knowledge and diagnostics on groundwater ». K. G. Villholth, E. Lopez-Gunn, K. Conti, A. Garrido et J. Van der Gun (éds.), *Advances in Groundwater Governance*. Leyde, Pays-Bas, CRC Press/Balkema, p. 193 à 213.

_____. 2019. « The global groundwater revolution ». *Oxford Research Encyclopedia, Environmental Science*. Oxford University Press. doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.632

_____. 2020. *Conjunctive Water Management. A Powerful Contribution to Achieving the Sustainable Development Goals*. Paris, UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375026.locale=en

Van der Gun J., Merla A., Jones M. et Burke, J. 2012. « Governance of the subsurface space and groundwater frontiers ». FAO/Groundwater Governance. *Thematic Papers on Groundwater*, p. 507 à 573. www.fao.org/3/i6040e/i6040e.pdf

Van Koppen B. 1998. *More Jobs per Drop: Targeting Irrigation to Poor Women and Men.* Wageningue/Amsterdam, Pays-Bas, Université de Wageningue/Institut royal des Tropiques.

Van Koppen B., Parthasarathy R. et Safiliou C. 2002. *Poverty Dimensions of Irrigation Management Transfer in Largescale Canal Irrigation in Andhra Pradesh and Gujarat, India*. Rapport de recherche Nº 61. Colombo, IWMI (Institut international de gestion des ressources en eau).

Van Weert F., Van der Gun J. et Reckman J. 2009. *Global Overview of Saline Groundwater Occurrence and Genesis*. Utrecht, Pays-Bas, Centre international d'évaluation des ressources en eaux souterraines (IGRAC). www.un-igrac.org/resource/global-overview-saline-groundwater-occurrence-and-genesis-report

Velis M., Conti K. I. et Biermann F. 2017. « Groundwater and human development: Synergies and trade-offs within the context of the sustainable development goals ». *Sustainability Science*, vol. 12, p. 1007 à 1017. doi.org/10.1007/s11625-017-0490-9

Venkanta M. K. 2021. « Scarcity for whom? Tracing the history of groundwater use and inequality in Gujarat, India». *Water Science Policy,* 27 mars 2021. watersciencepolicy.com/article/scarcity-for-whom-tracing-the-history-of-groundwater-use-and-inequality-in-gujarat-india-931dd9c94fac?language=English

Verhoeven R., Willems E., Harcouët-Menou V., De Boever E., Hiddes L., Veld P. O. et Demollin E. 2014. « Minewater 2.0 project in Heerlen the Netherlands: Transformation of a geothermal mine water pilot project into a full scale hybrid sustainable energy infrastructure for heating and cooling ». *Energy Procedia*, vol. 46, p. 58 à 67. doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.158

Verma S. et Shah M. 2019. *Drought-Proofing through Groundwater Recharge: Lessons from Chief Ministers' Initiatives in Four Indian States*. Washington, D.C., Banque mondiale. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/33240

Vij S., Warner J. et Barua A. 2020. « Power in water diplomacy ». *Water International*, vol. 45, nº 4, p. 249 à 253. doi.org/10.1080/02508060.2020.1778833

Villar P. C. et Costa Ribeiro W. 2011. « The agreement on the Guarani Aquifer: A new paradigm for transboundary groundwater management? » *Water International*, vol. 36, nº 5, p. 646 à 660. doi.org/10.1080/02508060.2011.603671

Villholth K. G. 2013a. « Groundwater irrigation for smallholders in Sub-Saharan Africa — a synthesis of current knowledge to guide sustainable outcomes ». *Water International*, vol. 38, nº 4, p. 369 à 391. doi.org/10.1080/02508060.2013.821644

_____. 2013b. « Integrated groundwater use and management in vulnerable coastal zones of Asia-Pacific » C. Wetzelhuetter (éds.), *Groundwater in the Coastal Zones of Asia-Pacific*. Dordrecht, Pays-Bas, Springer, p. 317 à 342.

Villholth K. G. et Ross A. n.d. *Overview on Groundwater-Based Natural Infrastructure*. Groundwater Solutions Initiative for Policy and Practice (GRIPP). gripp.iwmi.org/natural-infrastructure/overview-on-groundwater-based-natural-infrastructure/ (consulté le 8 juin 2021)

Villholth K. G., Tøttrup C., Stendel M., Maherry A. et Claassen M. 2011. *SADC Regional Groundwater Drought Vulnerability Mapping*. Rapport final. Communauté de développement de l'Afrique australe (SADC). www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/SADC Regional Groundwater Drought Risk Mapping.pdf

Vishwakarma B. D., Bates P., Sneeuw N., Westaway R. M. et Bamber J. L. 2021. « Re-assessing global water storage trends from GRACE time series ». *Environmental Research Letters*, vol. 16, nº 3, art. 034005. doi.org/10.1088/1748-9326/abd4a9

Vrba, J. et Verhagen, B. (éds.). 2011. *Groundwater for Emergency Situations: A Methodological Guide.* UNESCO-PHI-VII Series on Groundwater No. 3. Paris, UNESCO.

Wada Y. 2016. « Modeling groundwater depletion at regional and global scales: Present state and future prospects ». *Surveys in Geophysics*, vol. 37, p. 419 à 451. doi.org/10.1007/s10712-015-9347-x

Wada Y., Lo M-H., Yeh P. J-F., Reager J. T., Famiglietti J. S., Wu R-J. et Tseng Y-H. 2016. « Fate of water pumped from underground and contributions to sea-level rise ». *Nature Climate Change*, vol. 6, p. 777 à 780. doi.org/10.1038/NCLIMATE3001

Wada Y., Van Beek L. P. H., Van Kempen C. M., Reckman J. W. T. M., Vasak S. et Bierkens M. F. P. 2010. « Global depletion of groundwater resources ». *Geophysical Research Letters*, vol. 37, nº 20, L20402. doi.org/10.1029/2010GL044571

Wahome C. N. 2013. *Contamination Levels of Groundwater, Antimicrobial Resistance Patterns, Plasmid Profiles and Chlorination Efficacy in Ongata Rongai, Kajiado North County, Kenya*. Thèse de master. Nairobi, Université Kenyatta. ir-library.ku.ac.ke/handle/123456789/8960

Walker D., Parkin G., Schmitter P., Gowing J., Tilahun S. A., Haile A. T. et Yimam A. Y. 2019. « Insights from a multi-method recharge estimation comparison study ». *Groundwater*, vol. 57, nº 2, p. 245 à 258. doi.org/10.1111/gwat.12801

Walvoord M. A. et Kurylyk B. L. 2016. « Hydrologic impacts of thawing permafrost — A review ». *Vadose Zone Journal*, vol. 15, nº 6, p. 1 à 20. doi.org/10.2136/vzj2016.01.0010

Wang J., Rothausen S. G. S. A., Conway D., Zhang L., Xiong W., Holman I. P. et Li Y. 2012. « China's water-energy nexus: Greenhouse-gas emissions from groundwater use for agriculture ». *Environmental Research Letters*, vol. 7, nº 1, art. 014035. doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/014035

Watts R., Walton D. et Knox D. 2021. *Blueprint: Financing a Future of Safe Water, Sanitation and Hygiene for All.* washmatters.wateraid.org/publications/blueprint-financing-a-future-of-safe-water-sanitation-and-hygiene-for-all

Welsien K. 2016. *Project Information Document (Concept Stage) — Accelerating Solar Water Pumping via Innovative Financing — P161757*. Washington, D.C., Banque mondiale. documents.worldbank.org/curated/en/797711478099764040/Project-Information-Document-Concept-Stage-Accelerating-Solar-Water-Pumping-via-Innovative-Financing-P161757

Wentworth A., Pavelic P., Kongmany S., Sotoukee T., Sengphaxaiyalath K., Phomkeona K., Deevanhxay P., Chounlamany V. et Manivong V. 2021. *Environmental Risks from Pesticide Use: The Case of Commercial Banana Farming in Northern Lao PDR*. IWMI Research Report No. 177. Colombo, IWMI (Institut international de gestion des ressources en eau). doi.org/10.5337/2021.207

Werner A. D., Sharp H. K., Galvis S. C., Post V. E. A. et Sinclair P. 2017. « Hydrogeology and management of freshwater lenses on atoll islands: Review of current knowledge and research needs ». *Journal of Hydrology*, vol. 551, p. 819 à 844. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.047

White E. K., Peterson T. J., Costelloe J., Western A. W. et Carrara E. 2016. « Can we manage groundwater? A method to determine the quantitative testability of groundwater management plans ». *Water Resources Research*, vol. 52, nº 6, p. 4863 à 4882. doi.org/10.1002/2015WR018474

WHYMAP. 2008. *Groundwater Resources of the World: Large Aquifer Systems*. Base de données de WHYMAP. Hanovre, Allemagne/Paris, BGR/UNESCO. ihp-wins.unesco.org/layers/geonode:world_aquifer_systems (consulté le 5 août 2020)º

Wiese B. U. et Nimtz M. 2019. « Energy balance of the carbon dioxide injection facility in Ketzin, Germany ». *Applied Energy*, vol. 239, p. 626 à 634. doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.223

WRI (Institut des ressources mondiales). 2019. Site web de WRI Aqueduct. www.wri.org/aqueduct

Wu G. C., Deshmukh R., Ndhlukula K., Radojicic T., Reilly-Moman J., Phadke A., Kammen D. M. et Callaway D. S. 2017. « Strategic siting and regional grid interconnections key to low-carbon futures in African countries ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 114, n°15, p. E3004 à E3012. doi.org/10.1073/pnas.1611845114

Wurtsbaugh W. A., Miller C., Null S. E., DeRose R. J., Wilcock P., Hahnenberger M., Howe F. et Moore J. 2017. « Decline of the world's saline lakes ». *Nature Geoscience*, vol. 10, p. 816 à 821. doi.org/10.1038/NGEO3052

WWAP (Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau). 2015. *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2015 : l'eau pour un monde durable*. Paris, UNESCO. www.unesco.org/new/fr/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/2015-water-for-a-sustainable-world/

_____. 2019. *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2019 : ne laisser personne pour compte.* Paris, UNESCO. fr.unesco.org/water-security/wwap/wwdr/2019

WWAP (Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau)/ONU-Eau. 2018. *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau : les solutions fondées sur la nature pour la gestion de l'eau*. Paris, UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261466_fre

WWF (Fonds mondial pour la nature). 2019. *Freshwater Risks & Opportunities: An Overview and Call to Action for the Financial Sector*. Berlin, WWF Allemagne. wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/wwf_waterrisk_financialvalue_part4_keypiece_web.pdf

WWQA (World Water Quality Alliance). 2021. *Assessing Groundwater Quality: A Global Perspective: Importance, Methods and Potential Data Sources.* Rapport élaboré par Friends of Groundwater au sein de WWQA, Nairobi.

X

Xiao K.-Q., Li B., Ma L., Bao P., Zhou X., Zhang T. et Zhu Y.-G. 2016. « Metagenomic profiles of antibiotic resistance genes in paddy soils from South China ». *FEMS Microbiology Ecology*, vol. 92, nº 3. fiw023. doi.org/10.1093/femsec/fiw023

Xie H., Ringler C. et Hossain Mondal A. 2021. « Solar or diesel: A comparison of costs for groundwater-fed irrigation in sub-Saharan Africa under two energy solutions ». *Earth's Future*, vol. 9, nº 4. doi.org/10.1029/2020EF001611

Xinhua. 2020. « China launches planning for soil environment protection for next five years ». China Daily, 25 mai 2020. www.chinadaily.com.cn/a/202005/25/WS5ecb5365a310a8b241158349.html

Xu T., Yan D., Weng B., Bi W., Do P., Liu F., Wang Y. et Ma J. 2018. « The effect evaluation of comprehensive treatment for groundwater overdraft in Quzhou County, China ». *Water*, vol. 10, nº 7, art. 874. doi.org/10.3390/w10070874

Y

Yannopoulos S. I., Lyberatos G., Theodossiou N., Li W., Valipour M., Tamburrino A. et Angelakis A. N. 2015. « Evolution of water lifting devices (pumps) over the centuries worldwide ». *Water*, vol. 7, nº 9, p. 5031 à 5060. doi.org/10.3390/w7095031

Yechieli Y. et Wood W. W. 2002. « Hydrogeologic processes in saline systems: Playas, sabkhas, and saline lakes ». *Earth-Science Reviews*, vol. 58, nº 3-4, p. 343 à 365. doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00067-3

Z

Zeeberg J. 2009. *Flood Control in the Netherlands: A Strategy for Dike Reinforcement and Climate Adaptation*. Leyde, Pays-Bas, Rijnland Water Control Board. doi.org/10.13140/RG.2.1.5127.9445

Zhang T., Barry R. G., Knowles K., Ling F. et Armstrong R. L. 2003. « Distribution of seasonally and perennially frozen ground in the Northern Hemisphere ». L. U. Arenson, M. Phillips, S. M. Springman (éds.), *Permafrost: Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost, Zurich, Switzerland*. Rotterdam, Pays-Bas, A.A. Balkema, p. 1289 à 1294.

Zhao Y., Wang L., Li H., Zhu Y., Wang Q., Jiang S., Zhai J. et Hu P. 2020. « Evaluation of groundwater overdraft governance measures in Hengshui City, China ». *Sustainability*, vol. 12, nº 9, art. 3564. doi.org/10.3390/su12093564

Zhou Y., Sawyer A. H., David C. H. et Famiglietti J. S. 2019. « Fresh submarine groundwater discharge to the near-global coast ». *Geophysical Research Letters,* vol. 46, nº 11, p. 5855 à 5863. doi.org/10.1029/2019GL082749

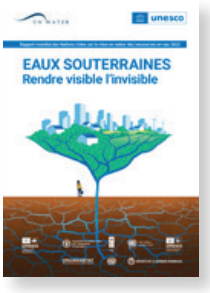
Acronymes

AfD	Agence française de développement
AIE	Agence internationale de l'énergie
AIH	Association internationale des hydrogéologues
APD	Aide publique au développement
ASR	Stockage et récupération de l'eau par les aquifères
AWS	Alliance for Water Stewardship (norme AWS)
BASM	Bassin aquifère sénégalo-mauritanien
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CDI	Commission du droit international
CDN	Contribution déterminée au niveau national
CDP	anciennement le Carbon Disclosure Project
CEE-ONU	Commission économique des Nations Unies pour l'Europe
CESAO	Commission économique et sociale pour l'Asie occidentale
CME	Conseil mondial de l'eau
DCE	Directive-cadre sur l'eau
DDT	Dichlorodiphényltrichloréthane
DIKTAS	Système aquifère karstique dinaric
EAU	Émirats arabes unis
ENSO	El Niño et l'oscillation australe
ET	Évapotranspiration
EU	États-Unis d'Amérique
EUWI+	Initiative de l'Union européenne pour l'eau relative aux pays du Partenariat oriental
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FEM	Fonds pour l'environnement mondial
FIDA	Fonds international de développement agricole
GAA	Accord relatif à la gestion du système aquifère Guarani
GAS	Système aquifère Guarani
GDE	Écosystèmes dépendant des eaux souterraines
GGIS	Système mondial d'information sur les eaux souterraines
GGRETA	Gouvernance des ressources en eaux souterraines dans les aquifères transfrontaliers
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GIRE	Gestion intégrée des ressources en eau
GPGC	Projet mondial d'établissement d'une climatologie des précipitations
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
GSHP	Pompe à chaleur géothermique
GTR	Groupe de travail régional
IGRAC	Centre international d'évaluation des ressources en eaux souterraines
ISARM	Initiative sur la gestion des ressources des aquifères transnationaux
IWMI	Institut international de gestion des ressources en eau
JMP	Programme commun OMS/UNICEF de suivi de l'approvisionnement en eau, de l'assainissement et de l'hygiène
LULC	Occupation des sols et du couvert végétal
MAR	Gestion de la recharge des aquifères
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
ODD	Objectif de développement durable
OEA	Organisation des États américains
OMS	Organisation mondiale de la Santé
ONU	Organisation des Nations Unies
ONUDI	Organisation des Nations Unies pour le développement industriel
PEI	Parcs éco-industriels
PEID	Petit État insulaire en développement
PHI	Programme hydrologique intergouvernemental
PNUD	Programme des Nations Unies pour le développement
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'environnement
PSE	Paiement pour services liés aux écosystèmes
RECP	Production propre et économe en ressources
SADC	Communauté de développement de l'Afrique australe
SETA	Stockage d'énergie thermique en aquifères
SFI	Société financière internationale
SGS	Systèmes géothermiques stimulés
SISR	Service d'information sur les Sites Ramsar
SIWI	Institut international de l'eau à Stockholm
SLR	Élévation du niveau de la mer
SPIS	Systèmes d'irrigation à énergie solaire
TBA	Aquifère transfrontalier
TSF	Installations de stockage des résidus
UE	Union européenne
UICN	Union internationale pour la conservation de la nature et de ses ressources
UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture
UNICEF	Fonds des Nations Unies pour l'enfance
WASH	Eau, assainissement et hygiène
WfWP	Women for Water Partnership
WHYMAP	Programme mondial d'évaluation et de cartographie hydrogéologiques
WWAP	Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau
WWDR	Rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau
ZRL	Zéro rejet liquide

RAPPORT MONDIAL DES NATIONS UNIES SUR LA MISE EN VALEUR DES RESSOURCES EN EAU

ISBN 978-92-3-200225-9
© UNESCO 2021
228 pages
Prix : 45,00 EUR0

WWDR 2021 En couleur, avec encadrés, figures, cartes, tableaux, notes, photographies, bibliographie et liste des acronymes, ainsi que les avant-propos de la Directrice générale de l'UNESCO, Audrey Azoulay, et du Président d'ONU-Eau et Président de l'IFAD, Gilbert F. Houngbo



ISBN 978-92-3-200252-5
© UNESCO 2022
272 pages
Prix : 55,00 EUR

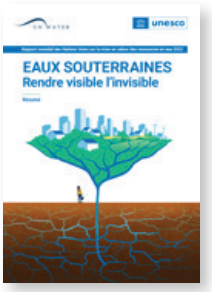
WWDR 2022 En couleur, avec encadrés, figures, cartes, tableaux, notes, photographies, bibliographie et liste des acronymes, ainsi que les avant-propos de la Directrice générale de l'UNESCO, Audrey Azoulay, et du Président d'ONU-Eau et Président de l'IFAD, Gilbert F. Houngbo

Pour télécharger, au format PDF, le rapport et les publications associées, les anciennes éditions du WWDR et d'autres supports d'information, rendez vous à l'adresse suivante : fr.unesco.org/wwap

PUBLICATIONS ASSOCIÉES

Résumé du
WWDR 2021
12 pages
Disponible en allemand, anglais, arabe, chinois, coréen, espagnol, français, hindi, italien, portugais et russe

Faits et chiffres du
WWDR 2021
12 pages
Disponible en anglais, espagnol, français, italien et portugais



Résumé du
WWDR 2022
12 pages
Disponible en allemand, anglais, arabe, chinois, coréen, espagnol, français, hindi, italien, portugais et russe

Faits et chiffres du
WWDR 2022
12 pages
Disponible en anglais, espagnol, français, italien et portugais

Pour télécharger ces documents, consultez l'adresse suivante : fr.unesco.org/wwap

unesco
Programme mondial
pour l'évaluation
des ressources en eau

RAPPORTS D'ONU-EAU

UN WATER

ONU-Eau coordonne les efforts des entités de l'Organisation des Nations Unies et des organisations internationales qui travaillent sur les questions d'eau et d'assainissement. Ce faisant, ONU-Eau cherche à accroître l'efficacité de l'appui fourni aux États Membres dans leurs efforts pour parvenir à des accords internationaux sur l'eau et l'assainissement. Les publications d'ONU-Eau s'appuient sur l'expérience et l'expertise des membres et partenaires d'ONU-Eau.

Bilan 2021 de mise en œuvre de l'ODD 6 — note de synthèse

Cette note de synthèse fournit un bilan actualisé des progrès accomplis dans la réalisation de l'ensemble des cibles de l'ODD 6 et identifie les domaines prioritaires. Produit par l'Initiative d'ONU-Eau pour le suivi intégré de l'ODD 6, elle présente de nouvelles données nationales, régionales et mondiales sur tous les indicateurs mondiaux de l'ODD 6.

Bilan 2021 de mise en œuvre de l'ODD 6 — huit rapports, un par indicateur mondial de l'ODD 6

Cette série de rapports dresse un bilan et une analyse détaillée des progrès accomplis dans la réalisation des différentes cibles de l'ODD 6, et identifie les domaines prioritaires : progrès accomplis dans l'accès à l'eau potable, à l'assainissement et à l'hygiène (OMS et UNICEF) ; progrès dans le traitement des eaux usées (OMS et ONU-Habitat) ; progrès dans la qualité de l'eau (PNUE) ; progrès dans l'utilisation efficace de l'eau (FAO) ; progrès sur les niveaux de stress hydrique (FAO) ; progrès dans la gestion intégrée des ressources en eau (PNUE) ; progrès de la coopération dans la gestion des eaux transfrontières (CEE-ONU et UNESCO) ; progrès au niveau des écosystèmes liés à l'eau (PNUE). Produits par les agences en charge, ces rapports présentent de nouvelles données nationales, régionales et mondiales sur tous les indicateurs mondiaux de l'ODD 6.

Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau

Abordant un thème différent chaque année, le Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau est le rapport phare d'ONU-Eau sur les questions d'eau et d'assainissement. Le rapport est publié par l'UNESCO, au nom d'ONU-Eau, et sa production est coordonnée par le Programme mondial de l'UNESCO pour l'évaluation des ressources en eau. Le rapport expose les principales évolutions de l'état, de l'utilisation et de la gestion de l'eau douce et de l'assainissement sur la base des travaux réalisés par les membres et les partenaires d'ONU-Eau. Publié à l'occasion de la Journée mondiale de l'eau, le WWDR met à disposition des décideurs des connaissances et des outils pour leur permettre de concevoir et mettre en œuvre des politiques durables en matière d'eau. Il présente aussi certaines des meilleures pratiques ainsi que des analyses approfondies, qui stimuleront les idées et galvaniseront les actions aux fins d'une meilleure gestion dans le secteur de l'eau et au-delà.

Analyse et évaluation mondiales sur l'assainissement et l'eau potable (GLAAS) d'ONU-Eau

GLAAS est produit par l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) pour le compte d'ONU-Eau. Elle fournit un compte-rendu actualisé des cadres politiques, des accords institutionnels, des ressources humaines et des flux financiers, internationaux et nationaux, en appui aux domaines de l'eau et de l'assainissement. Elle contribue de manière substantielle aux activités relatives à l'Assainissement et l'eau pour tous (SWA) ainsi qu'à l'élaboration du bilan de mise en œuvre de l'ODD 6 (voir ci-dessus).

Les rapports d'activité du Programme commun OMS/UNICEF de suivi de l'approvisionnement en eau, de l'assainissement et de l'hygiène (JMP)

Le JMP est affilié à ONU-Eau et présente les résultats du suivi mondial des progrès réalisés en vue d'atteindre les cibles de l'ODD 6, à savoir l'accès universel à une eau potable sûre et abordable ainsi qu'à un assainissement et une hygiène adéquats et équitables. Tous les deux ans, le JMP publie des estimations et des rapports d'activité actualisés sur la mise en place des services WASH dans les foyers, les écoles et les établissements de soins de santé.

Notes d'orientation et notes analytiques

Les notes d'orientation d'ONU-Eau fournissent des orientations politiques, brèves et informatives, sur les questions les plus urgentes liées à l'eau potable en s'appuyant sur les expertises combinées du système des Nations Unies. Les notes analytiques fournissent une analyse des problèmes émergents et peuvent servir de base à des recherches, des discussions et des orientations politiques futures.

PUBLICATIONS D'ONU-EAU À VENIR

- Note d'orientation d'ONU-Eau sur le genre et l'eau
- Note d'orientation actualisée d'ONU-Eau sur la coopération relative aux eaux transfrontières
- Note analytique d'ONU-Eau sur l'efficacité de l'eau
- Études de cas sur la mise en œuvre par pays

LA JOURNÉE MONDIALE DE L'EAU ET LE RAPPORT MONDIAL DES NATIONS UNIES SUR LA MISE EN VALEUR DES RESSOURCES EN EAU

L'Organisation des Nations Unies désigne certaines journées, semaines, années et décennies afin de marquer des évènements ou attirer l'attention sur des sujets particuliers dans le but de promouvoir, grâce à une sensibilisation et des activités, les objectifs de l'Organisation.

Ces célébrations internationales sont l'occasion d'instruire le public sur des sujets de préoccupation, de galvaniser les volontés politiques, de mobiliser les ressources pour répondre aux problèmes mondiaux ainsi que de célébrer et renforcer les accomplissements de l'humanité.

La majorité de ces dates ont été établies par des résolutions de l'Assemblée générale des Nations Unies. La Journée mondiale de l'eau (22 mars) est issue de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement de 1992, lors de laquelle une célébration internationale de l'eau fut recommandée.

En réponse, l'Assemblée générale des Nations Unies a désigné le 22 mars 1993 comme la première Journée mondiale de l'eau. Elle est depuis célébrée chaque année, étant l'une des journées internationales les plus mobilisatrices avec la Journée internationale des femmes (8 mars), la Journée internationale de la paix (21 septembre) et la Journée des droits de l'homme (10 décembre).

Chaque année, ONU-Eau — le mécanisme de coordination des Nations Unies en matière d'eau et d'assainissement — choisit, pour la Journée mondiale de l'eau, un thème qui correspond à un défi actuel ou futur lié à l'eau. Ce thème définit également le thème du *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau*, rapport qui est présenté lors de la Journée mondiale de l'eau. Cette publication est le rapport phare d'ONU-Eau et met à disposition des décideurs des connaissances et des outils pour leur permettre de concevoir et mettre en œuvre des politiques durables en matière d'eau. Le rapport expose aussi les principales évolutions de l'état, de l'utilisation et de la gestion de l'eau douce et de l'assainissement sur la base des travaux réalisés par les membres et les partenaires d'ONU-Eau.

Le rapport est publié par l'UNESCO pour le compte d'ONU-Eau et sa production est coordonnée par le Programme mondial de l'UNESCO pour l'évaluation des ressources en eau.

Les eaux souterraines, qui constituent la grande majorité de toutes les réserves d'eau douce liquide sur Terre, apportent aux sociétés d'énormes bénéfices et opportunités sur le plan social, économique et environnemental. Les eaux souterraines jouent, en effet, un rôle central dans la lutte contre la pauvreté, la sécurité alimentaire et hydrique, la création d'emplois décents, le développement socio-économique, et la résilience des sociétés et des économies au changement climatique.

Pourtant, cette ressource naturelle reste mal comprise et, par conséquent, est sous-évaluée, mal gérée, voire gaspillée. En dépit de leur abondance générale, les eaux souterraines demeurent vulnérables à la surexploitation et à la pollution, qui peuvent toutes deux avoir des effets dévastateurs sur cette ressource et sa disponibilité. Dans un contexte marqué par des pénuries croissantes d'eau dans de nombreuses régions du monde, l'immense potentiel des eaux souterraines et la nécessité de les gérer de façon durable ne peuvent plus désormais être ignorés.

L'édition 2022 du Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau, intitulée *Eaux souterraines : rendre visible l'invisible*, décrit les défis et les opportunités que présentent l'exploitation, la gestion et la gouvernance des eaux souterraines dans le monde. Le rapport examine les questions relatives aux eaux souterraines sous l'angle des trois principaux secteurs d'utilisation de l'eau (agriculture, établissements humains et industrie) ainsi que leurs interactions avec les écosystèmes et leur relation au changement climatique. Il met également en avant différentes perspectives régionales et présente un certain nombre de solutions possibles en matière de données et d'informations, de politiques et de planification, de gestion et de gouvernance ainsi que de financement.

Abordant un thème différent chaque année, le Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau est le rapport phare d'ONU-Eau sur les questions d'eau et d'assainissement. Le rapport est publié par l'UNESCO, au nom d'ONU-Eau, et sa production est coordonnée par le Programme mondial de l'UNESCO pour l'évaluation des ressources en eau. Le rapport expose les principales évolutions de l'état, de l'utilisation et de la gestion de l'eau douce et de l'assainissement sur la base des travaux réalisés par les membres et les partenaires d'ONU-Eau. Publié à l'occasion de la Journée mondiale de l'eau, le rapport met à disposition des décideurs des connaissances et des outils pour leur permettre de concevoir et de mettre en œuvre des politiques durables. Il présente aussi certaines des meilleures pratiques ainsi que des analyses approfondies, qui stimuleront les idées et galvaniseront les actions aux fins d'une meilleure gestion dans le secteur de l'eau et au-delà.

Nous remercions le Gouvernement italien et
la Regione Umbria pour leur soutien financier

Regione Umbria

9 789232 002525