

# Hydrogéologie

Objets, méthodes, applications



# Hydrogéologie

Objets, méthodes, applications

5<sup>e</sup> édition

**Éric Gilli**

Professeur à l'université Paris 8 (Vincennes-Saint-Denis)

**Christian Mangan**

Hydrogéologue-conseil à Cannes

**Jacques Mudry**

Professeur honoraire à l'université de Franche-Comté (Besançon)

**DUNOD**

Illustration de couverture :  
Seljalandsfoss, ON-Photography-Adobe Stock.com

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p>	 <p><b>DANGER</b> LE PHOTOCOPIAGE TUE LE LIVRE</p>	<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.</p> <p>Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
--	--	--

© Dunod, 2008, 2012, 2016, 2021  
11, rue Paul Bert – 92240 Malakoff  
ISBN 978-2-10-081913-3

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

# Table des matières

AVANT-PROPOS	XV
LISTE DES ABRÉVIATIONS	XVI

## PARTIE I

---

### NOTIONS D'HYDROGÉOLOGIE

CHAPITRE 1 • DÉFINITION ET HISTOIRE DE L'HYDROGÉOLOGIE	3
1.1 Étymologie et définition	3
1.2 Histoire	4
1.3 Les axes de recherche actuels	7
CHAPITRE 2 • PLACE DES EAUX SOUTERRAINES DANS LES SCIENCES DE LA TERRE	9
2.1 Eau souterraine et géodynamique externe	9
2.2 Eau et pétrole	10
2.3 Eau et gîtes minéraux	10
2.4 Transferts de fluide profonds	11
2.5 Rôle de l'eau dans le magmatisme	11
CHAPITRE 3 • DÉBOUCHÉS DE L'HYDROGÉOLOGIE	12
3.1 L'eau source de vie	12
3.2 L'eau source de gêne	13
3.3 Protection et gestion des ressources en eau	13
3.4 Place et débouchés de l'hydrogéologie	14

---

<b>CHAPITRE 4 • LES CYCLES DE L'EAU</b>	15
4.1 Le cycle interne	15
4.1.1 Origine de l'eau sur Terre	15
4.1.2 Cycle interne de l'eau	17
4.2 Répartition de l'eau	18
4.2.1 Le cycle de l'eau	20
4.2.2 Les systèmes hydrologiques et les bilans	22
4.2.3 L'évapotranspiration	24
<b>CHAPITRE 5 • L'INFILTRATION DE L'EAU DANS LE SOUS-SOL ET LA NOTION D'AQUIFÈRE</b>	29
5.1 Mécanisme de l'infiltration	29
5.2 Rôle de la structure et de la lithologie	31
5.3 Différents types d'aquifères (poreux, fissurés, karstiques)	33
5.4 Importance relative selon les ensembles structuraux	35
5.4.1 Massifs anciens magmatiques et métamorphiques	35
5.4.2 Bassins sédimentaires	35
5.4.3 Chaînes alpines et méditerranéennes	35
5.4.4 Piémonts des chaînes alpines	36
5.4.5 Pays volcaniques	36
5.4.6 Plateaux calcaires	36
<b>CHAPITRE 6 • LES AQUIFÈRES POREUX ET LA CIRCULATION DE L'EAU DANS LE SOUS-SOL</b>	38
6.1 Caractéristiques hydrodynamiques	39
6.2 La loi de Darcy, ses domaines d'application	39
6.3 Paramètres hydrodynamiques de la nappe	40
6.4 La circulation de l'eau dans le sous-sol : la piézométrie	41
<b>CHAPITRE 7 • LES AQUIFÈRES FISSURÉS</b>	43
7.1 Répartition mondiale et importance économique	43
7.2 L'hydrogéologie africaine	45
<b>CHAPITRE 8 • LES AQUIFÈRES KARSTIQUES</b>	48
8.1 La karstification	48
8.1.1 Phénomène	48
8.1.2 Polyphasage	50
8.2 L'hydrosystème karstique : organisation spatiale	51
8.2.1 Principe général	51
8.2.2 Exemples	52

8.3	Conséquences pour le fonctionnement	53
8.3.1	Fonctionnement hydraulique	53
8.3.2	Conséquences qualitatives	54
8.4	Le plus grand aquifère karstique de France : la fontaine de Vaucluse	55
8.4.1	Description générale	55
8.4.2	Origine du système	58
<b>CHAPITRE 9 • LES AQUIFÈRES INSULAIRES ET LITTORAUX</b>		<b>60</b>
9.1	L'affrontement de deux milieux	60
9.1.1	Répartition et importance économique	60
9.1.2	Le biseau ou coin salé	61
9.1.3	Action anthropique	62
9.1.4	Incidence des variations de niveau de la mer	63
9.2	Aquifères karstiques littoraux	64
9.2.1	Particularités des sources karstiques littorales et sous-marines	65
9.2.2	Origine de sources karstiques sous-marines	66
9.2.3	Hypothèses sur le fonctionnement	67
9.2.4	L'exemple des moulins d'Argostoli	70
9.2.5	L'exemple de Port Miou	71
9.3	L'hypereustatisme et ses conséquences	75
<b>CHAPITRE 10 • LES EAUX THERMOMINÉRALES ET LA GÉOTHERMIE</b>		<b>76</b>
10.1	Définition	76
10.2	Origine de la chaleur	77
10.2.1	Eaux juvéniles	77
10.2.2	Réchauffement et minéralisation secondaires	77
10.3	La géothermie	80
<b>CHAPITRE 11 • LA QUALITÉ DES EAUX</b>		<b>84</b>
11.1	Caractéristiques naturelles	84
11.2	Les contaminants naturels	85
11.2.1	Dissolution et altération	85
11.2.2	Biseau salé	85
11.2.3	Milieux confinés	86
11.2.4	Matière organique naturelle	86
11.3	Les pollutions anthropiques	86
11.3.1	Pollution domestique	86
11.3.2	Pollution urbaine	86
11.3.3	Pollution industrielle	87
11.3.4	Pollution agricole	87

11.4	Les contaminations induites par l'activité humaine	88
11.5	L'autoépuration	88

## PARTIE II

### OUTILS ET MÉTHODE DE L'HYDROGÉOLOGIE

<b>CHAPITRE 12 • DOCUMENTATION PRÉALABLE</b>		93
12.1	Cartes topographiques et géologiques	93
12.2	Inventaires et fichiers	94
12.3	Publications et rapports inédits	94
12.4	Cartographie numérique	95
<b>CHAPITRE 13 • ÉTUDE DE LA GÉOMÉTRIE DES RÉSERVOIRS AQUIFÈRES</b>		96
13.1	Observations et reconnaissances de terrain	96
13.2	Prospection géophysique	99
13.2.1	Caractéristiques générales	99
13.2.2	Limites des méthodes géophysiques	104
13.3	Sondages de reconnaissance	105
13.4	Puits, tranchées et galeries de reconnaissance	106
13.5	Synthèse géométrique	106
<b>CHAPITRE 14 • CARACTÉRISATION DES AQUIFÈRES</b>		110
14.1	Infiltration de l'eau	110
14.2	Restitution de l'eau	112
14.2.1	Nature et localisation des sources	112
14.2.2	Conditions d'émergence	113
14.2.3	Débit et régime des sources	114
14.3	Échanges entre réservoirs aquifères	115
14.4	Piézométrie des nappes	117
14.4.1	Définitions et méthodes	117
14.4.2	Cartes piézométriques	118
14.4.3	Variations piézométriques	122
14.5	Essais d'eau et pompages d'essai	123
14.5.1	Mesures en laboratoire	123
14.5.2	Essais ponctuels en puits ou sondages	124
14.5.3	Pompages d'essai	125



14.6	Les analyses d'eau	129
14.6.1	Les analyses physico-chimiques	130
14.6.2	Les isotopes	137
14.6.3	Les analyses microbiologiques	139
14.7	Les méthodes d'étude des aquifères karstiques	140
14.7.1	Particularités du karst	140
14.7.2	Études paléogéographiques	140
14.7.3	Études hydrométriques et physico-chimiques	141
14.7.4	La spéléologie	142
14.7.5	Les traçages d'eau ou traçages d'essais	144
14.7.6	Les essais de vidange prolongée	148
14.8	La modélisation des écoulements souterrains	150
14.8.1	Définition et objectif d'un modèle numérique	150
14.8.2	Création d'un modèle	150
14.8.3	Modèles déterministes, spatialisés ou maillés	151
14.8.4	Modèles stochastiques ou globaux	152
14.8.5	Choix et fiabilité des modèles	152
<b>CHAPITRE 15 • SYNTHÈSES HYDROGÉOLOGIQUES ET BILANS</b>		155
<b>CHAPITRE 16 • SOURCIERS ET SOURCELLERIE</b>		159

### PARTIE III

## LA RESSOURCE EN EAU

<b>CHAPITRE 17 • LES BESOINS EN EAU ET LEUR ÉVOLUTION</b>		163
17.1	Consommation d'eau	163
17.2	Usages domestiques et agriculture	165
17.2.1	L'AEP : alimentation en eau potable	165
17.2.2	Fonctionnement urbain	166
17.2.3	Agriculture	167
17.2.4	Mise en bouteilles	167
17.3	Usages techniques de l'eau souterraine	168
17.3.1	Énergie hydraulique et hydroélectricité	168
17.3.2	Refroidissement des centrales thermiques et nucléaires	169
17.3.3	Pompes à chaleur et géothermie	169
17.3.4	Industrie	169

<b>CHAPITRE 18 • L'EXPLOITATION DES AQUIFÈRES</b>	171
18.1 Recherches préalables	171
18.2 Méthodes de captage	172
18.2.1 Captages de sources	172
18.2.2 Tranchées drainantes et galeries drainantes	173
18.2.3 Puits et puits à drains rayonnants	174
18.2.4 Forages d'eau	175
18.3 Entretien des captages	176
18.4 L'exploitation des aquifères littoraux	177
18.4.1 Cas généraux	177
18.4.2 Les aquifères karstiques littoraux	179
<b>CHAPITRE 19 • LA PROTECTION DES AQUIFÈRES</b>	182
19.1 La réglementation européenne	182
19.2 Le contrôle sanitaire de l'eau potable	182
19.3 Vulnérabilité, aléa, risque	186
19.3.1 Vulnérabilité	186
19.3.2 Aléa et risque	186
19.4 Les périmètres de protection	187
19.4.1 Périmètre de protection immédiate (PPI)	188
19.4.2 Périmètre de protection rapprochée (PPR)	189
19.4.3 Périmètre de protection éloignée (PPE)	190
19.4.4 Périmètres de protection satellites (PPIs ou PPRs)	190
19.5 Le problème des nitrates	191
19.6 Effluents domestiques et assainissement	193
19.7 L'épuration	193
19.7.1 L'épuration autonome	194
19.7.2 L'épuration collective	194
<b>CHAPITRE 20 • LA GESTION DES AQUIFÈRES</b>	196
20.1 Définition	196
20.2 Les études	198
20.2.1 L'acquisition des données, les contrôles et les suivis sur les bassins	198
20.2.2 L'acquisition de la connaissance au niveau de l'aquifère	200
20.3 Les actions sur les aquifères	201
20.3.1 Actions quantitatives	201
20.3.2 Actions qualitatives	208
20.4 L'optimisation de l'exploitation des aquifères karstiques	211
20.4.1 Barrages souterrains	211
20.4.2 Le cas de la source du Lez	211

<b>CHAPITRE 21 • EXEMPLES DE RECHERCHE D'EAU POUR AEP</b>	215
21.1 Exploitation d'une nappe libre (Mouans-Sartoux, Alpes-Maritimes)	215
21.2 Exploitation d'une nappe captive (bassin du Paillon, Alpes-Maritimes)	218

## PARTIE IV

### HYDROGÉOLOGIE DU GÉNIE CIVIL

<b>CHAPITRE 22 • L'EAU ET LA CONSTRUCTION</b>	223
22.1 Fluctuations naturelles de la nappe	223
22.2 Influence des ouvrages établis en terrain aquifère	225
22.2.1 Rôle de barrière hydraulique	225
22.2.2 Rabattement provoqué	226
<b>CHAPITRE 23 • LES MOUVEMENTS DE TERRAIN</b>	228
23.1 L'eau et les instabilités	228
23.2 Les glissements	229
23.2.1 Caractéristiques et particularités des glissements	229
23.2.2 Causes des glissements	230
23.2.3 Traitement des glissements	230
23.2.4 Exemple du glissement de la Clapière (Alpes-Maritimes, Saint-Étienne-de-Tinée)	234
23.2.5 Exemple du glissement d'Ardisson (Alpes-Maritimes, La Trinité)	236
23.2.6 Exemple du glissement du Quiaus (Alpes-Maritimes, Gorbio)	239
23.3 Les affaissements et effondrements	241
23.3.1 Caractérisation et causes	241
23.3.2 Évolution naturelle	242
23.3.3 Impact des actions humaines	245
23.3.4 Exemple d'effondrements à Mougins (Alpes-Maritimes) en 1998	248
<b>CHAPITRE 24 • LES TRAVAUX SOUTERRAINS</b>	254
24.1 Problèmes posés par l'eau souterraine	254
24.2 Incidence des eaux souterraines sur la conduite des travaux	254
24.3 Impact hydrogéologique des tunnels sur leur environnement	258
24.4 Exemple du tunnel ferroviaire de Braus (Alpes-Maritimes)	259
24.4.1 Caractéristiques générales	259
24.4.2 Conditions géologiques et hydrogéologiques	259

24.4.3 Problèmes hydrogéologiques posés par le creusement du tunnel	261.
24.4.4 Enseignements à tirer de cette expérience	263
24.5 Exemple du tunnel ferroviaire de Monte-Carlo (principauté de Monaco)	263
24.5.1 Caractéristiques générales	263
24.5.2 Conditions géologiques et hydrogéologiques	264
24.5.3 Problèmes hydrogéologiques posés par le creusement du tunnel	265
24.5.4 Enseignements à tirer de cette expérience	266
<b>CHAPITRE 25 • LES BARRAGES ET LES RETENUES</b>	268
25.1 Caractéristiques générales	268
25.2 Stabilité des barrages	269
25.2.1 Effet de l'érosion régressive et des renards	270
25.2.2 Effet des sous-pressions	272
25.2.3 Prévention et traitement	274
25.3 Étanchéité des retenues	274
25.3.1 Phénomènes d'épigénie	275
25.3.2 Substratum karstique	276
25.4 Instabilités des rives de retenues	281
25.4.1 Instabilités naturelles	281
25.4.2 Rôle des vidanges	282
25.4.3 Exemple du glissement du Vajont (Italie)	282
<b>CHAPITRE 26 • LES STOCKAGES SOUTERRAINS ET LES GAZ DE SCHISTES</b>	285
26.1 Le stockage souterrain du gaz	285
26.2 Le stockage des déchets nucléaires	286
26.2.1 Nature des déchets	286
26.2.2 Contexte hydrogéologique des sites de stockage	287
26.3 L'exploitation des gaz de schistes	288
<b>CONCLUSION</b>	290
1 L'entité eau	290
2 L'importance socio-économique de l'eau	290
3 Le rôle stratégique de l'eau et les risques de conflits internationaux	291
3.1 Exemples en Europe	291
3.2 Exemples dans le monde arabe	292
4 Eau et développement durable	295
4.1 Aspect quantitatif	295
4.2 Aspect qualitatif	296
5 L'hydrogéologue du futur : gestionnaire des eaux souterraines	297

---

<b>ANNEXE • DIRECTIVE 2006/118/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL</b>	299
<b>PROBLÈMES</b>	303
<b>ORIENTATION BIBLIOGRAPHIQUE</b>	337
Références générales non citées	337
Références bibliographiques	337
<b>LEXIQUE : ANGLAIS-FRANÇAIS</b>	349
<b>LEXIQUE : FRANÇAIS-ANGLAIS</b>	357
<b>SITES INTERNET</b>	363
<b>INDEX</b>	365



# Avant-propos

La fin du xx<sup>e</sup> siècle a été marquée par une prise de conscience planétaire de l'importance de la sauvegarde de l'environnement. Le xxi<sup>e</sup> siècle s'attelle à d'immenses chantiers dont celui d'offrir de l'eau potable à tous les habitants de la planète. Face à la démographie galopante et à la pollution, l'eau pure devient de plus en plus rare. Tantôt source de vie, tantôt source de mort, alliée ou ennemie, l'eau est indissociable de l'histoire de l'Homme. Elle est un enjeu vital qu'il faut apprendre à gérer et à partager. De nombreux conflits du monde moderne sont, si on y regarde de près, liés à l'enjeu de la possession de l'eau. Nous vivons depuis plusieurs décennies les guerres de l'or noir, mais les guerres de l'or bleu sont déjà présentes.

L'hydrogéologie intéresse de nombreux domaines de la société. Pourtant, même s'il n'est d'acte plus anodin que celui d'ouvrir un robinet ou de tirer une chasse d'eau, l'origine de l'eau reste souvent baignée de mystère. Veines d'eau au cheminement tortueux, immenses lacs souterrains, baguettes, pendules, peuplent les récits de nos compatriotes. Pagnol n'est pas si loin, lorsque l'on voit des élus préférer le sourcier à l'hydrogéologue pour définir l'avenir de leur collectivité ; on peut alors comprendre l'immense travail qui reste à accomplir pour faire vaciller l'obscurantisme qui règne encore dans ce domaine pourtant si proche de nous.

Écrire un ouvrage sur l'hydrogéologie est une démarche délicate du fait de l'universalité de cette matière et des immenses progrès réalisés depuis 150 ans. Aussi, l'association d'un hydrogéologue, d'un géographe et d'un ingénieur nous a semblé une démarche nécessaire pour permettre l'approche pluridisciplinaire qu'impose de plus en plus la science moderne. Les auteurs ont voulu privilégier une vision la plus large possible et illustrer chaque chapitre par des exemples pris en France quand cela était possible. Chaque domaine abordé souffre donc de sa superficialité, mais nous espérons que le lecteur pourra y satisfaire sa curiosité et que cela le conduira à se plonger dans des ouvrages plus spécialisés.

# Liste des abréviations

ADES	accès aux données des eaux souterraines
AEP	alimentation en eau potable
AFSSA	Agence française de sécurité sanitaire des aliments (devenue ANSES, Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail)
ANDRA	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs
ARS	Agence régionale de santé
ASR	<i>aquifer storage recovery</i>
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
BTEX	benzène toluène éthylbenzène xylène
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CDS	Comité départemental de spéléologie
COD	carbone organique dissous
COT	carbone organique total
COV	composés organiques volatils
DCE	Directive cadre sur l'eau (européennes)
DDAF	Direction départementale de l'agriculture et de la forêt (devenue DDTM)
DDASS	Direction départementale de l'action sanitaire et sociale (devenue ARS)
DDE	Direction départementale de l'équipement (devenue DDTM)
DDTM	Direction départementale des territoires et de la mer
DIREN	Direction régionale de l'environnement (devenue DREAL)
DREAL	Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement
EDF	Électricité de France
ETP	évapotranspiration potentielle
ETR	évapotranspiration réelle
ET <sub>0</sub>	évapotranspiration de référence
GPS	<i>global positioning system</i>
HAP	hydrocarbures aromatiques polycycliques
HDR	<i>hot dry rock</i>
HFR	<i>hot fractured rock</i>
IFEN	Institut français de l'environnement (devenu SDES, Service de la donnée et des études statistiques)
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière (anciennement Institut géographique national)
LEMA	Loi sur l'eau et les milieux aquatiques
MISE	Mission interservices de l'eau
MWe	mégawatt électrique
PC	poste de commande
PFVL	produit de fission à longue durée de vie
PPI	périmètre de protection immédiate
PPR	périmètre de protection rapprochée
PPE	périmètre de protection éloignée
PVC	polychlorure de vinyle
RAN	recharge artificielle de nappe
RFU	réserve facilement utilisable = RU max
RU	réserve utile
RMP	résonance magnétique protonique
RNDE	Réseau national des données sur l'eau (devenu SIE)
SDES	Service de la donnée et des études statistiques
SIE	Système d'information sur l'eau
VER	volume élémentaire représentatif
VLF	<i>very low frequency</i>
ZNS	zone non saturée



PARTIE I

---

# **NOTIONS D'HYDROGÉOLOGIE**



## Chapitre 1

---

# Définition et histoire de l'hydrogéologie

### 1.1 ÉTYMOLOGIE ET DÉFINITION

L'hydrogéologie (du grec *hydra* : l'eau, *ge* : la terre et *logos* : le discours) peut être définie comme la science qui traite de l'eau souterraine. Cependant, l'eau est une entité : eau des précipitations, eaux de surface, glaces, eaux souterraines participent à un cycle perpétuel. L'hydrogéologie est donc indissociable de l'hydrologie de surface, de la climatologie, de la géologie, de la géographie. De plus, comme toutes les sciences modernes, elle fait appel aux innombrables domaines de la physique, de la chimie et de la biologie. L'eau devenant un enjeu de plus en plus important, l'hydrogéologue moderne est aussi confronté à des problèmes sociaux et politiques. Plus, peut-être, que toute autre science, l'hydrogéologie impose aujourd'hui une approche pluridisciplinaire. La définir précisément est donc un exercice difficile. Où commence et où se termine le monde souterrain de l'hydrogéologue ? L'eau contenue dans le magma en fait-elle partie ? Les sources chaudes des dorsales sous-marines relèvent-elles de l'hydrogéologie ? Doit-on qualifier d'eau souterraine une rivière qui traverse une grotte-tunnel comme au Mas d'Azil (Ariège) ? Le sol, où se produisent d'importantes réactions physico-chimiques et d'où l'eau peut être extraite par la végétation, est-il un domaine souterrain ? Le pergélisol et les glaces souterraines n'intéressent-il pas plus le glaciologue ? Le lecteur comprendra donc que la définition toute simple de « science de l'eau souterraine » est suffisamment vague pour rester la plus précise.

## 1.2 HISTOIRE

Le corps humain ne peut se passer d'eau plus de deux jours. La quête de l'eau est nécessairement la première action de l'homme dans l'étude de son environnement. Chez les grands singes on assiste déjà à la recherche d'une certaine qualité. Les chimpanzés et les babouins, lorsque l'eau est boueuse, savent ainsi creuser des trous dans les berges des cours d'eau pour récupérer de l'eau filtrée. Cette première démarche d'hydrogéologue qui remonte donc au-delà des origines de l'homme, laisse imaginer que nos ancêtres avaient certainement le souci de disposer d'une bonne eau de boisson. La présence fréquente de sources à proximité des habitats préhistoriques pourrait traduire cette recherche de qualité.

### a) *Les plus anciennes relations*

Tout comme les guérisseurs ont précédé la médecine et les alchimistes la chimie, l'art du sourcier, ancêtre toujours présent de l'hydrogéologue, se perd dans la nuit des temps (*cf. chapitre 16*). La Bible décrit Moïse frappant une roche pour en faire jaillir une source ; s'agit-il d'une version religieuse de la baguette du sourcier ?

Quelques textes antiques décrivent des eaux souterraines. Mille ans avant notre ère, le Styx d'Homère, visité par Ulysse, ressemble à une classique rivière souterraine. Un texte en caractères cunéiformes, gravé en -800 av. J.-C. à l'entrée de la grotte du Tunnel de Tigris (Lice, Turquie), relate la visite, par le roi assyrien Shoulman Asharédou III, du cours souterrain, long de quelques centaines de mètres, du fleuve Tigre. Une plaque en bronze, découverte dans le palais du roi et actuellement au British Museum de Londres, décrit cette incursion et montre le rôle de l'eau de percolation dans la construction d'une stalagmite (Hill et Forti, 1997).

### b) *Les modèles des Grecs*

Les savants de l'Antiquité gréco-romaine ont interprété de nombreux phénomènes hydrogéologiques sans apporter de solution satisfaisante (Ellenberger, 1988). Le monde méditerranéen est en effet riche en phénomènes karstiques majeurs, avec d'importantes sources utilisées pour alimenter les cités. Les Anciens, confrontés à ces systèmes complexes, se sont écartés des schémas simples et ceci a sans doute été un frein à la découverte des mécanismes fondamentaux de l'hydrogéologie. On souhaitait de plus définir une mécanique universelle permettant de relier entre eux des phénomènes aussi variés que le volcanisme, les courants marins ou les importantes sources.

Malgré la connaissance de systèmes perte-résurgence, comme celui de la Reka (Slovénie) et de sa résurgence à la source du Timavo, près de Trieste (Italie), cités par Strabon (1<sup>er</sup> siècle av. J.-C.), les eaux de surface et les eaux souterraines étaient considérées comme deux domaines distincts. Ayant observé que, malgré l'apport de nombreux fleuves, le niveau de la mer ne montait pas, les Anciens imaginaient l'existence de pertes marines absorbant un flot d'eau de mer continu, hypothèse sans doute appuyée par l'exemple des katavotres d'Argostoli (Céphalonie, Grèce) où l'eau de mer qui s'engouffre dans des pertes marines actionne des moulins

(cf. chapitre 9.2.4). Aristote (IV<sup>e</sup> siècle av. J.-C.) pense ainsi que la mer Caspienne se déverse dans la mer Noire grâce à un exutoire profond. Ces pertes permettaient aussi d'expliquer les courants marins. Pour Anaxagore (V<sup>e</sup> siècle av. J.-C.), cette eau de mer infiltrée alimentait d'immenses réservoirs souterrains d'eau douce. Platon (IV<sup>e</sup> siècle av. J.-C.) imagine plutôt un immense gouffre, le Tartare, recevant tous les cours d'eau et alimentant mers, lacs, fleuves et sources. Mais pour retenir une origine marine, il faut envisager la filtration du sel et un mécanisme permettant l'ascension de l'eau dans les terres. En observant probablement les violents panaches de vapeur des volcans et les courants d'air de certaines grottes, Thalès (V<sup>e</sup> siècle av. J.-C.) suppose que le moteur se trouve dans la poussée des terres et dans les souffles souterrains. Lucrèce (I<sup>er</sup> siècle av. J.-C.) suppose que la mer est filtrée de son sel par les terres.

Pourtant quelques mécanismes fondamentaux avaient été perçus. Aristote (IV<sup>e</sup> siècle av. J.-C.) avait pressenti les mécanismes de l'évaporation. Vitruve (I<sup>er</sup> siècle av. J.-C.) avait ébauché le cycle de l'eau en observant que l'eau des vallées s'élevait des points bas, formait des nuages puis de la pluie, s'infiltrait dans les fissures du sol pour réapparaître au pied des montagnes. Hérodote (V<sup>e</sup> siècle av. J.-C.), puis Pline (I<sup>er</sup> siècle) avaient saisi la relation entre les dolines, lieux privilégiés d'infiltration de l'eau, et les sources.

Cependant Sénèque (I<sup>er</sup> siècle), synthétisant dans « Questions Naturelles » les pensées de ses prédécesseurs ne retient que l'existence d'un immense réservoir souterrain d'eau douce alimenté par la transformation en eau de l'air contenu dans des cavités souterraines.

### c) Le Moyen Âge et la Renaissance : l'alambic souterrain

Au Moyen Âge, la pensée grecque reste la seule admise lorsqu'elle est compatible avec la Bible et l'invention de l'imprimerie permet la diffusion de la pensée.

Un des premiers ouvrages consacré aux eaux souterraines est celui de Jacques Besson (1569) « L'art et science de trouver les eaux et fontaines cachées sous terre », mais le véritable précurseur de l'hydrogéologie est Bernard Palissy auteur de l'ouvrage « Des Eaux et des Fontaines » (1580). Il démontre que l'eau des sources a pour origine les pluies infiltrées dans les fissures et abîmes du sous-sol jusqu'à des niveaux imperméables où elles s'accumulent en réserves souterraines et circulent en direction des sources. Des observations dans les grottes des Pyrénées lui montrent que les panaches de vapeur d'eau exhalés par certaines grottes sont aussi liés aux eaux d'infiltration.

Pourtant ses pensées ne s'imposent pas et la théorie généralement admise est celle de l'alambic souterrain (*figure 1*), où l'eau de mer qui pénètre sous terre par des canaux, abandonnant son sel, est chauffée par le feu central, puis condensée dans les montagnes, pour y alimenter des lacs souterrains qui se déversent à l'extérieur par des sources.

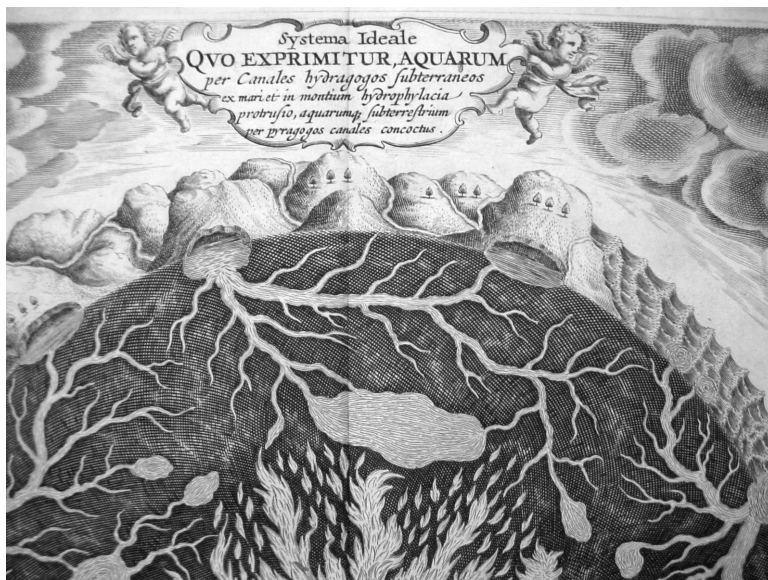


Figure 1 L'alambic souterrain : gravure du XVII<sup>e</sup> siècle.

#### d) Le XVII<sup>e</sup> siècle : le cycle de l'eau

La géologie moderne est en train de naître en Occident. Quelques ouvrages majeurs traitant des eaux souterraines peuvent être signalés « *Mundus subterraneus* » (Athanasius Kircher, 1665) ; « *Principia philosophiae* » (Descartes, 1664) ; « *Prodromus* » (Stenon, 1669), mais ils reprennent le concept de l'alambic souterrain. C'est en 1674, que l'ouvrage de Pierre Perrault « *De l'origine des Fontaines* », révèle l'importance de l'évaporation et de l'infiltration. Perrault prouve que le débit du cours amont de la Seine ne correspond qu'au sixième de la quantité d'eau de pluie reçue par le bassin. Une fraction importante de l'eau a donc disparu. Mariotte (1620-1684) arrive à la même conclusion et, à la même époque, Halley (1656-1742) quantifie l'évaporation. Le moteur permettant le passage de l'eau de la mer aux montagnes et le mécanisme de la filtration du sel sont ainsi élucidés en même temps. La notion moderne de cycle de l'eau naît donc au XVII<sup>e</sup> siècle, après plus de deux millénaires de discussions des plus grands savants de la planète.

#### e) La naissance de l'hydrogéologie

Les concepts de base de l'infiltration ayant été posés, les mécanismes du devenir de l'eau à la surface du sol sont précisés par La Métherie (1791).

En 1856 Darcy, ingénieur des Ponts et Chaussées, en charge de l'alimentation en eau de Dijon, définit la loi mathématique qui, reliant perméabilité des terrains et gradient hydraulique, régit le parcours des eaux souterraines (cf. chapitre 6.2). Cette loi marque le début de l'hydrogéologie moderne. Les grands problèmes de l'hydrogéologie de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle sont surtout liés au creusement des puits et à l'exploitation des nappes alluviales. Les études sont de ce fait nombreuses. Elles

concernent principalement les relations entre la géologie et les eaux souterraines, la définition des lois de l'hydraulique souterraine et l'étude de la chimie des eaux.

À cette même époque, à Campriou (Gard), Édouard Alfred Martel, en suivant le cours souterrain du ruisseau du Bonheur jusqu'à la source de Bramabiau, jette les bases de la spéléologie. Mais cette dernière activité, jugée trop sportive, est généralement dédaignée par les universitaires et ce n'est que vers 1960 que la création du laboratoire de Moulis par Philippe Renault et Félix Trombe entraîne la naissance en France de l'hydrogéologie karstique, branche à laquelle une part importante de cet ouvrage sera consacrée.

Le <sup>xx</sup>e siècle voit l'essor des grands travaux parfois pharaoniques, tels que les gigantesques barrages sur les grands fleuves, modifiant l'hydrogéologie de régions entières, ou la Grande rivière de l'Homme (Libye) (*cf. conclusion*). Ces grands chantiers sont parfois endeuillés de drames comme la catastrophe de Malpasset (*cf. chapitre 25*) qui montrent le rôle important de l'hydrogéologie en génie civil.

La fin du <sup>xx</sup>e siècle est marquée par l'apparition de la modélisation numérique. L'ordinateur, s'appuyant sur la loi de Darcy et ses dérivés et collectant les données acquises par l'instrumentation toujours plus performante grâce aux progrès de l'électronique, permet de simuler le fonctionnement des aquifères et d'en faciliter la gestion. Mais c'est aussi le siècle de la pollution et la contamination des aquifères de Bretagne et de Normandie par les nitrates n'est hélas que le premier d'une multitude de problèmes qualitatifs qui vont s'amplifier dans le futur.

## 1.3 LES AXES DE RECHERCHE ACTUELS

### a) Hydrogéologie appliquée

L'hydrogéologie du <sup>xxi</sup>e siècle doit faire face à un défi : comment offrir de l'eau potable aux 9,7 milliards d'habitants de la Terre en 2050 ? Ceci dans un contexte où la notion de développement durable s'est imposée. L'hydrogéologie du futur sera certainement celle de la gestion active des aquifères (Detay, 1997). Si la ressource globale est jugée satisfaisante sur le plan quantitatif, la protection contre les pollutions est probablement le débouché principal des études hydrogéologiques.

Ainsi, à l'échelle de l'Hexagone, un travail immense reste à accomplir : la mise en œuvre de la directive cadre communautaire du 23 octobre 2000 complétée par la nouvelle loi sur l'eau et les milieux aquatiques de 2006. Ces textes requéraient, pour 2015, de rendre conformes à des normes européennes, sauf exceptions justifiées, les différentes catégories de « masses » d'eau présentes sur le territoire, y compris les eaux souterraines. Grâce à la mise en réseau des intervenants et au lancement d'actions concertées, d'importants progrès ont pu être réalisés. Mais de nouvelles pollutions existent (antibiotiques, hormones) issues des consommations humaines et animales ; elles sont rejetées dans le milieu naturel où leur comportement reste très mal connu. L'année 2015 est terminée et beaucoup de travail reste à faire pour atteindre les objectifs fixés. Cependant cette échéance a permis une véritable prise de conscience

de la nécessité de protéger les milieux aquatiques et d'importantes actions ont pu être débutées qui se poursuivent.

La gestion des déchets organiques, chimiques ou nucléaires, pose le problème de la contamination à long terme des aquifères. Comment être assurés que les déchets nucléaires enfouis dans des formations jugées imperméables et stockés dans des conteneurs étanches ne vont pas, au fil des siècles, subir l'action de l'eau souterraine et contaminer pendant des milliers d'années l'eau de nos descendants ?

### *b) Hydrogéologie fondamentale*

Quelques axes de recherche peuvent être soulignés, comme le rôle de l'eau dans la tectonique et le magmatisme, la profondeur des circulations souterraines, la compréhension des mécanismes de mise en place des grands systèmes karstiques (Fontaine de Vaucluse, Port Miou), la modélisation des écoulements karstiques et le rôle de la microbiologie dans les propriétés physico-chimiques des eaux souterraines.

Aujourd'hui, l'hydrogéologie s'exporte au-delà de la Terre puisque les fabuleuses images et données de Mars envoyées par la sonde européenne Mars Express et les robots Spirit et Opportunity apportent la preuve de la circulation d'eau martienne qui est peut-être encore présente à l'état liquide dans le sous-sol de la planète rouge. Les vestiges d'une mer salée ont été découverts, et de nombreuses formes du relief traduisent, non seulement la présence d'écoulements d'eau de surface dans le passé, mais aussi l'existence de sources et d'affaissements pseudo-karstiques liés à des circulations d'eau souterraine.

À la suite d'observations de glace vive et de gouttes d'eau, l'analyse de traces d'écoulement sur certains versants, variables selon les prises de vue, suggérait fortement l'existence d'écoulements actuels d'eau souterraine probablement salée. Cela a été confirmé par la NASA en 2015 grâce au spectromètre embarqué sur la sonde Mars Reconnaissance Orbiter (Ojha, 2015).



## Chapitre 2

---

# Place des eaux souterraines dans les sciences de la Terre

Les eaux souterraines sont un agent géologique général ; elles jouent un rôle actif dans les processus géodynamiques, grâce à la large distribution spatiale de leur écoulement et à leur forte capacité à interagir avec l'environnement (Toth, 1999). Ces deux propriétés existent, avec une intensité variable, à toutes les échelles de temps et d'espace. Les interactions chimiques incluent précipitation/dissolution, hydratation, hydrolyse, oxydoréduction, attaque acide, échange de bases... Les interactions physiques comprennent les phénomènes de concentration, de nanofiltration, de lubrification et de modification des pressions de pore. L'interaction hydrodynamique ou cinétique comprend les processus de convection, avec transfert de masse (eau, solutés, particules) ou d'énergie (chaleur).

### 2.1 EAU SOUTERRAINE ET GÉODYNAMIQUE EXTERNE

Dans la géodynamique externe, l'eau souterraine a deux actions fondamentales de vecteur et de solvant. En qualité de solvant, l'eau souterraine a joué au cours des temps géologiques un rôle dans la mise en solution des minéraux. Selon leur solubilité et/ou leur rapidité d'altération, la surface terrestre va évoluer à une vitesse plus ou moins perceptible à l'échelle humaine. Ainsi, un seul épisode de pluie sur un diapir salé en zone aride va produire des modifications instantanées de la morphologie, un écoulement d'eau rapide dans des gypses provoquer des effondrements sensibles à l'échelle annuelle, la karstification des calcaires et dolomies être tout juste perceptible à l'échelle humaine et l'altération des roches endogènes se faire avec des effets morphologiques visibles à l'échelle pluri-séculaire.

En revanche, dans son rôle de vecteur, l'eau déplace les substances en solution, en émulsion ou en suspension. Du fait de la taille variable des vides dans le milieu souterrain, les eaux pourront entraîner seulement certains petits ions (cas des barrières de perméabilité argileuses dans certains gisements de pétrole), ou bien l'ensemble des substances en solution (cas général des aquifères), ou encore les solutés plus des particules en suspension (argiles, particules organiques dont parasites, bactéries, virus...) dans le cas des aquifères avec des drains (chenaux graveleux en nappe alluviale, fractures dans les roches consolidées, drains karstiques).

Dans le cycle de l'eau, le partage entre ruissellement et infiltration aura donc une grande incidence sur l'érosion des sols et des roches des bassins versants, sur l'écrêtement des pics de crue et sur le soutien des débits d'étiage des cours d'eau. Ce partage est à la fois fonction de la perméabilité des sols et de leur substratum, mais aussi du régime des précipitations. Ainsi, un orage méditerranéen en milieu marneux engendrera une crue violente, de courte durée et une forte turbidité dans les eaux de surface, alors qu'une précipitation océanique de même hauteur sur un plateau crayeux peu karstifié ne provoquera qu'une montée très amortie du niveau des eaux de surface, sans incidence sur leur turbidité.

## 2.2 EAU ET PÉTROLE

Dans les gisements de pétrole, les hydrocarbures (huile et gaz) expulsés des roches mères (où ils ont mûri) par la pression lithostatique, migrent vers la surface en remplaçant l'eau plus dense dans les pores des roches, jusqu'à ce qu'ils rencontrent un piège, la roche réservoir couverte par une roche peu perméable (argileuse ou compacte), dans une configuration géométrique favorable (biseau, dôme anticlinal, coin de faille...). Pétrole et gaz subissent un entraînement par l'écoulement latéral des eaux souterraines ; à leur différence de densité et de viscosité près, ils obéissent aux mêmes lois d'écoulement que l'eau. Cependant, la migration des hydrocarbures est un phénomène lent et la circulation d'eau souterraine peut modifier la taille des vides de la roche (cimentation ou dissolution des grains – Machel 1999). Dans les milieux très peu perméables, la composition chimique de l'eau originellement salée peut être modifiée dans le sens d'une concentration (saumures de gisement de pétrole).

## 2.3 EAU ET GÎTES MINÉRAUX

Tant dans le domaine des grands bassins sédimentaires que dans celui de l'hydrothermalisme (Garven *et al.* 1999), l'eau souterraine est le vecteur des minéralisations. Dans le premier cas, les écoulements lents dans des milieux à porosité différente, dans l'autre la remontée d'eaux profondes par les fractures, permettent la cristallisation de minéraux. Ainsi, la migration de saumures dans les fractures du socle hercynien, grâce à la dénivelée topographique, a permis l'accumulation de dépôts plombifères géants dans des carbonates en Amérique du Nord.

## 2.4 TRANSFERTS DE FLUIDE PROFONDS

La circulation de fluides (gaz + liquides) dans des fractures d'importance crustale permet la remontée des circuits thermominéraux caractérisés par des minéralisations élevées en certains composés dissous et en gaz (dioxyde de carbone, radon...) des sources carbo-gazeuses. Ce contenu minéral, dont les propriétés thérapeutiques ont été utilisées dans le thermalisme, peut aussi présenter des risques sanitaires (arsenic, baryum, fluor, radioactivité).

## 2.5 RÔLE DE L'EAU DANS LE MAGMATISME

L'eau souterraine joue un rôle majeur dans la dynamique volcanique. En période normale, l'infiltration d'eau météorique (pluie ou neige) sur les volcans, qui sont des reliefs souvent élevés, donc plus intensément arrosés que leur piémont, alimente l'essentiel de la production de leur panache de vapeur. En cas d'apport massif d'eau souterraine en profondeur (déversement d'une nappe dans la cheminée, précipitations exceptionnelles...) cette eau vadose est le phénomène déclencheur des éruptions volcaniques, car elle peut se vaporiser au contact de la lave chaude. S'ensuivent des éruptions explosives, qui pulvérisent le bouchon de lave formé dans la cheminée. Les maars, le phréatomagmatisme sont des types de fonctionnement volcanique dans lesquels l'eau joue un rôle encore plus grand, en renforçant le caractère explosif des éruptions.

## Chapitre 3

---

# Débouchés de l'hydrogéologie

### 3.1 L'EAU SOURCE DE VIE

L'eau est un élément indispensable à l'être humain qui, au repos, en consomme deux à trois litres par jour, fournis pour moitié par son alimentation. C'est en fait la survie de toutes les espèces animales et végétales qui est conditionnée par l'eau, constituant des animaux à 70 % et des végétaux à 90 %.

Les besoins en eau de l'homme augmentent considérablement dans le temps et touchent à des domaines de plus en plus nombreux pour satisfaire ses exigences de confort et d'agrément et pour répondre à une demande économique croissante.

La consommation d'eau pour les usages domestiques subit un accroissement très sensible, indépendamment de la progression démographique (*cf. chapitre 17*). La moyenne journalière par habitant dépasse aujourd'hui en France 200 litres, alors qu'elle était de 160 litres en 1990, 145 litres en 1980 et 130 litres en 1975. Les besoins alimentaires n'en représentent qu'une part réduite, de l'ordre de 4 % (1 % pour la boisson et 3 % pour la cuisson des aliments), et ce sont donc les autres usages qui ont le plus augmenté, suivant en cela la progression du niveau de vie et du confort de l'homme.

On constate en outre, du fait d'une exigence accrue des normes sanitaires et du développement des forages profonds, une sollicitation croissante des eaux souterraines, mieux protégées des pollutions que les eaux superficielles.

Les autres usages de l'eau ne nécessitent pas d'eau potable, mais représentent la majeure partie des besoins. Leur progression dans le temps est également

spectaculaire pour les mêmes raisons et pour répondre aux exigences de la rentabilité des entreprises et de l'économie de marché.

Sauf pour la production hydroélectrique et pour le refroidissement des centrales thermoélectriques qui consomment beaucoup d'eau mais prélèvent essentiellement dans les rivières, les autres activités sollicitent de plus en plus les ressources souterraines, aisément accessibles aujourd'hui et n'influent pas directement sur le « débit réservé » des cours d'eau.

Cette production d'eau augmente très vite dans les pays européens et aux États-Unis où elle donne parfois lieu à des gaspillages. Sa répartition est en revanche très inégale et les zones d'utilisation intensive ne sont pas toujours les mieux pourvues par la nature. La ressource est en outre relativement faible dans certains pays d'Asie, du Proche-Orient et d'Afrique qui sont confrontés à des déséquilibres croissants.

## 3.2 L'EAU SOURCE DE GÊNE

L'eau souterraine a une influence très importante sur la majorité des problèmes de construction et de génie civil, sur les conditions d'aménagement du territoire et sur la protection des biens et des personnes.

Son rôle n'a souvent été reconnu que tardivement, à la suite de véritables catastrophes ou après des sinistres plus limités se traduisant par des retards de chantiers, des incidences imprévues sur l'environnement, des destructions d'ouvrages, voire des pertes humaines.

L'intervention de l'hydrogéologue est aujourd'hui rentrée dans les mœurs et tend à se systématiser dans le cadre des grands travaux et des diverses études d'aménagement :

- travaux de terrassements et études de tracés (routiers, autoroutiers et ferroviaires) ;
- excavations profondes atteignant la nappe ou recoupant des horizons aquifères ;
- gros chantiers imposant des rabattements de nappe prolongés ;
- tunnels et travaux souterrains ;
- barrages ;
- étude et prévention des mouvements de terrain et des remontées de nappes.

## 3.3 PROTECTION ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Les eaux de consommation (boisson et cuisson), ainsi que les eaux qui rentrent dans la fabrication de produits alimentaires doivent répondre à des normes sanitaires de plus en plus strictes. Les autres usages sont nettement moins contraignants, mais possèdent souvent leurs propres critères de qualité, afin de garantir la protection du matériel utilisé et des produits traités ou fabriqués.

La protection des paramètres physico-chimiques de l'eau adaptés à ses différentes utilisations est de plus en plus considérée, en particulier en ce qui concerne l'alimentation humaine. Elle débouche sur des études d'impacts avant la mise en œuvre de projets susceptibles d'altérer la ressource en eau (décharges, rejets de substances

polluantes, stockages dangereux...) et sur la définition de périmètres de protection destinés à sécuriser les captages pour AEP.

La sollicitation accrue des nappes souterraines et les prélèvements excessifs dans certains aquifères ne sont pas toujours adaptés à leurs conditions de recharge et peuvent conduire à l'appauvrissement des réserves disponibles. La nécessité d'une gestion intégrée des nappes, d'un point de vue tant qualitatif que quantitatif, prend de plus en plus d'importance. Cette vision se généralise très nettement depuis quelques décennies et a été largement favorisée par la Loi sur l'Eau du 3 janvier 1992 et ses décrets d'application. Elle permet la prise en compte de l'eau souterraine dans une démarche globale d'aménagement, de protection et de gestion, intégrant également l'ensemble du milieu naturel et humain, et tend à accroître le rôle de l'hydrogéologue.

### 3.4 PLACE ET DÉBOUCHÉS DE L'HYDROGÉOLOGIE

Dans la société d'aujourd'hui, l'hydrogéologie occupe une place de plus en plus importante dans la politique d'aménagement du territoire, en particulier dans les régions à forte densité de population et/ou à fort développement industriel ou agricole.

L'hydrogéologue intervient dans de nombreux domaines de la vie publique :

- l'enseignement et la recherche au sein des structures de formation (universités et grandes écoles) et des organismes de recherche (CNRS, INRA, ministères) ;
- la recherche, l'étude, la protection et la gestion des ressources en eau souterraine ;
- l'examen de l'influence des eaux souterraines lors des grands travaux et des chantiers de génie civil, ainsi que l'impact de leur réalisation sur l'environnement hydrogéologique ;
- l'analyse du rôle de l'eau dans les mouvements gravitaires (éboulements, glissements, effondrements) et la prévision des remontées critiques de nappes.

Il s'intègre aussi de plus en plus fréquemment dans des équipes pluridisciplinaires (administrations, élus, urbaniste, paysagiste, hydrologue, économiste), soit à la faveur de programmes de diagnostic, de gestion ou de planification, soit à la faveur d'études prévisionnelles menées à l'échelle d'une région, d'un bassin, d'une communauté de communes, d'une commune, soit encore à l'occasion d'un grand projet structurant.