

HYDROGÉOLOGIE

Objets, méthodes, applications

Éric Gilli

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

Christian Mangan

Hydrogéologue-conseil à Nice

Jacques Mudry

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

4^e édition

DUNOD

Illustration de couverture : Forage et ferme solaire pour l'alimentation
d'un point d'eau dans le Sahara tunisien, © Éric Gilli

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. Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} 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	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. 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).
	

© Dunod, Paris, 2008, 2012, 2016

5 rue Laromiguière, 75005 Paris

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-075335-2

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	XI
--------------	----

LISTE DES ABRÉVIATIONS	XII
------------------------	-----

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
---	----

CHAPITRE 4 • LES CYCLES DE L'EAU	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
 CHAPITRE 5 • L'INFILTRATION DE L'EAU DANS LE SOUS-SOL ET LA NOTION D'AQUIFÈRE	 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
 CHAPITRE 6 • LES AQUIFÈRES POREUX ET LA CIRCULATION DE L'EAU DANS LE SOUS-SOL	 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
 CHAPITRE 7 • LES AQUIFÈRES FISSURÉS	 43
7.1 Répartition mondiale et importance économique	43
7.2 L'hydrogéologie africaine	45
 CHAPITRE 8 • LES AQUIFÈRES KARSTIQUES	 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
CHAPITRE 9 • LES AQUIFÈRES INSULAIRES ET LITTORAUX		60
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
CHAPITRE 10 • LES EAUX THERMOMINÉRALES ET LA GÉOTHERMIE		76
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
CHAPITRE 11 • LA QUALITÉ DES EAUX		84
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

CHAPITRE 12 • DOCUMENTATION PRÉALABLE	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
CHAPITRE 13 • ÉTUDE DE LA GÉOMÉTRIE DES RÉSERVOIRS AQUIFÈRES	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
CHAPITRE 14 • CARACTÉRISATION DES AQUIFÈRES	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	135
14.6.3 Les analyses microbiologiques	137
14.7 Les méthodes d'étude des aquifères karstiques	138
14.7.1 Particularités du karst	138
14.7.2 Études paléogéographiques	138
14.7.3 Études hydrométriques et physico-chimiques	139
14.7.4 La spéléologie	140
14.7.5 Les traçages d'eau ou traçages d'essais	142
14.7.6 Les essais de vidange prolongée	146
14.8 La modélisation des écoulements souterrains	148
14.8.1 Modèles déterministes	148
14.8.2 Modèles stochastiques ou globaux	149
 CHAPITRE 15 • SYNTHÈSES HYDROGÉOLOGIQUES ET BILANS	 151
 CHAPITRE 16 • SOURCIERS ET SOURCELLERIE	 155

PARTIE III

LA RESSOURCE EN EAU

CHAPITRE 17 • LES BESOINS EN EAU ET LEUR ÉVOLUTION	159
17.1 Consommation d'eau	159
17.2 Usages domestiques et agriculture	161
17.2.1 L'AEP : alimentation en eau potable	161
17.2.2 Fonctionnement urbain	162
17.2.3 Agriculture	163
17.2.4 Mise en bouteilles	163
17.3 Usages techniques de l'eau souterraine	164
17.3.1 Énergie hydraulique et hydroélectricité	164
17.3.2 Refroidissement des centrales thermiques et nucléaires	165
17.3.3 Pompes à chaleur et géothermie	165
17.3.4 Industrie	165
 CHAPITRE 18 • L'EXPLOITATION DES AQUIFÈRES	 167
18.1 Recherches préalables	167
18.2 Méthodes de captage	168
18.2.1 Captages de sources	168
18.2.2 Tranchées drainantes et galeries drainantes	169
18.2.3 Puits et puits à drains rayonnants	170
18.2.4 Forages d'eau	171

18.3	Entretien des captages	172
18.4	L'exploitation des aquifères littoraux	173
18.4.1	Cas généraux	173
18.4.2	Les aquifères karstiques littoraux	175
CHAPITRE 19 • LA PROTECTION DES AQUIFÈRES		178
19.1	La réglementation européenne	178
19.2	Le contrôle sanitaire de l'eau potable	178
19.3	Vulnérabilité, aléa, risque	182
19.3.1	Vulnérabilité	182
19.3.2	Aléa et risque	182
19.4	Les périmètres de protection	183
19.4.1	Périmètre de protection immédiate (PPI)	184
19.4.2	Périmètre de protection rapprochée (PPR)	185
19.4.3	Périmètre de protection éloignée (PPE)	186
19.4.4	Périmètres de protection satellites (PPI _s ou PPR _s)	186
19.5	Le problème des nitrates	187
19.6	Effluents domestiques et assainissement	189
19.7	L'épuration	189
19.7.1	L'épuration autonome	190
19.7.2	L'épuration collective	190
CHAPITRE 20 • LA GESTION DES AQUIFÈRES		192
20.1	Définition	192
20.2	Les études	194
20.2.1	L'acquisition des données, les contrôles et les suivis sur les bassins	194
20.2.2	L'acquisition de la connaissance au niveau de l'aquifère	196
20.3	Les actions sur les aquifères	197
20.3.1	Actions quantitatives	197
20.3.2	Actions qualitatives	204
20.4	L'optimisation de l'exploitation des aquifères karstiques	207
20.4.1	Barrages souterrains	207
20.4.2	Le cas de la source du Lez	207
CHAPITRE 21 • EXEMPLES DE RECHERCHE D'EAU POUR AEP		211
21.1	Exploitation d'une nappe libre (Mouans-Sartoux, Alpes-Maritimes)	211
21.2	Exploitation d'une nappe captive (bassin du Paillon, Alpes-Maritimes)	214

PARTIE IV

HYDROGÉOLOGIE DU GÉNIE CIVIL

CHAPITRE 22 • L'EAU ET LA CONSTRUCTION	219
22.1 Fluctuations naturelles de la nappe	219
22.2 Influence des ouvrages établis en terrain aquifère	221
22.2.1 Rôle de barrière hydraulique	221
22.2.2 Rabattement provoqué	222
CHAPITRE 23 • LES MOUVEMENTS DE TERRAIN	224
23.1 L'eau et les instabilités	224
23.2 Les glissements	225
23.2.1 Caractéristiques et particularités des glissements	225
23.2.2 Causes des glissements	226
23.2.3 Traitement des glissements	226
23.2.4 Exemple du glissement de la Clapière (Alpes-Maritimes, Saint-Étienne-de-Tinée)	230
23.2.5 Exemple du glissement d'Ardisson (Alpes-Maritimes, La Trinité)	232
23.2.6 Exemple du glissement du Quiaus (Alpes-Maritimes, Gorbio)	235
23.3 Les affaissements et effondrements	237
23.3.1 Caractérisation et causes	237
23.3.2 Évolution naturelle	238
23.3.3 Impact des actions humaines	241
23.3.4 Exemple d'effondrements à Mougins (Alpes-Maritimes) en 1998	244
CHAPITRE 24 • LES TRAVAUX SOUTERRAINS	250
24.1 Problèmes posés par l'eau souterraine	250
24.2 Incidence des eaux souterraines sur la conduite des travaux	250
24.3 Impact hydrogéologique des tunnels sur leur environnement	254
24.4 Exemple du tunnel ferroviaire de Braus (Alpes-Maritimes)	255
24.4.1 Caractéristiques générales	255
24.4.2 Conditions géologiques et hydrogéologiques	255
24.4.3 Problèmes hydrogéologiques posés par le creusement du tunnel	257
24.4.4 Enseignements à tirer de cette expérience	259
24.5 Exemple du tunnel ferroviaire de Monte-Carlo (principauté de Monaco)	259
24.5.1 Caractéristiques générales	259
24.5.2 Conditions géologiques et hydrogéologiques	260
24.5.3 Problèmes hydrogéologiques posés par le creusement du tunnel	261
24.5.4 Enseignements à tirer de cette expérience	262

CHAPITRE 25 • LES BARRAGES ET LES RETENUES	264
25.1 Caractéristiques générales	264
25.2 Stabilité des barrages	265
25.2.1 Effet de l'érosion régressive et des renards	266
25.2.2 Effet des sous-pressions	268
25.2.3 Prévention et traitement	270
25.3 Étanchéité des retenues	270
25.3.1 Phénomènes d'épigénie	271
25.3.2 Substratum karstique	272
25.4 Instabilités des rives de retenues	277
25.4.1 Instabilités naturelles	277
25.4.2 Rôle des vidanges	278
25.4.3 Exemple du glissement du Vajont (Italie)	278
CHAPITRE 26 • LES STOCKAGES SOUTERRAINS ET LES GAZ DE SCHISTES	281
26.1 Le stockage souterrain du gaz	281
26.2 Le stockage des déchets nucléaires	282
26.2.1 Nature des déchets	282
26.2.2 Contexte hydrogéologique des sites de stockage	283
26.3 L'exploitation des gaz de schistes	284
CONCLUSION	286
1 L'entité eau	286
2 L'importance socio-économique de l'eau	286
3 Le rôle stratégique de l'eau et les risques de conflits internationaux	287
3.1 Exemples en Europe	287
3.2 Exemples dans le monde arabe	288
4 Eau et développement durable	291
4.1 Aspect quantitatif	291
4.2 Aspect qualitatif	292
5 L'hydrogéologue du futur : gestionnaire des eaux souterraines	292
ANNEXE • DIRECTIVE 2006/118/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL	294
PROBLÈMES	298
ORIENTATION BIBLIOGRAPHIQUE	331
LEXIQUE : ANGLAIS-FRANÇAIS	341
LEXIQUE : FRANÇAIS-ANGLAIS	348
SITES INTERNET	354
INDEX	355

Avant-propos

La fin du XX^e siècle a été marquée par une prise de conscience planétaire de l'importance de la sauvegarde de l'environnement. Le XXI^e 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
ASR	<i>aquifer storage recovery</i>
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
BTEX	benzène toluène éthylbenzène xylène
CEA	Commissariat à l'énergie atomique
CDS	Comité départemental de spéléologie
COD	carbone organique dissous
COT	carbone organique total
COV	composés organiques volatils
DCE	Directive cadre européenne
DDAF	Direction départementale de l'agriculture et de la forêt
DDASS	Direction départementale de l'action sanitaire et sociale
DDE	Direction départementale de l'équipement
DIREN	Direction régionale de l'environnement
EDF	Électricité de France
ETP	évapotranspiration potentielle
ETR	évapotranspiration réelle
ET ₀	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 SOeS, service statistique du ministère du Développement durable)
IGN	Institut géographique national
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	chlorure de polyvinyle
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
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^{er} 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^e 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^e siècle av. J.-C.), cette eau de mer infiltrée alimentait d'immenses réservoirs souterrains d'eau douce. Platon (IV^e 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^e siècle av. J.-C.) suppose que le moteur se trouve dans la poussée des terres et dans les souffles souterrains. Lucrèce (I^{er} 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^e siècle av. J.-C.) avait pressenti les mécanismes de l'évaporation. Vitruve (I^{er} 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^e siècle av. J.-C.), puis Pline (I^{er} siècle) avaient saisi la relation entre les dolines, lieux privilégiés d'infiltration de l'eau, et les sources.

Cependant Sénèque (I^{er} 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.

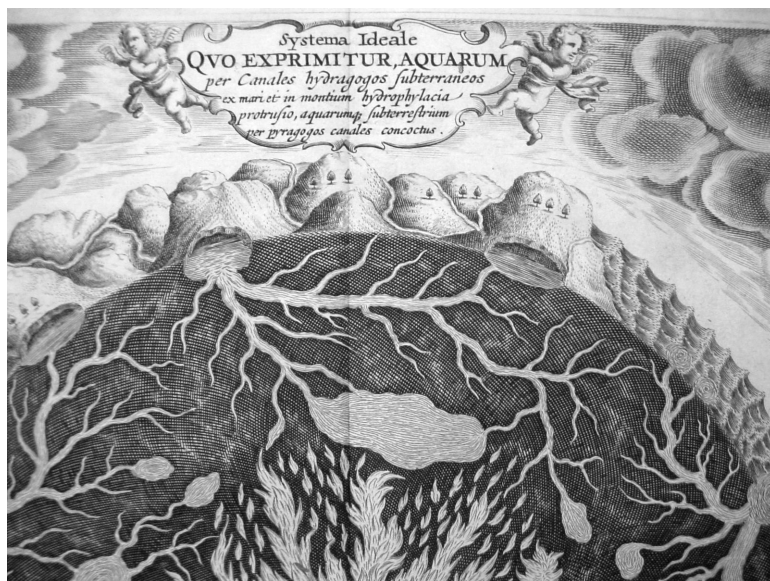


Figure 1 L'alambic souterrain : gravure du XVII^e siècle.

d) Le XVII^e 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^e 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^e siècle sont surtout liés au creusement des puits et à l'exploitation des nappes alluviales. Les études sont de ce fait nombreuses. Elles