

Jean Margat
Thierry Ruf

Les eaux souterraines sont-elles éternelles



90
clés pour
comprendre
les eaux
souterraines

éditions
Quæ

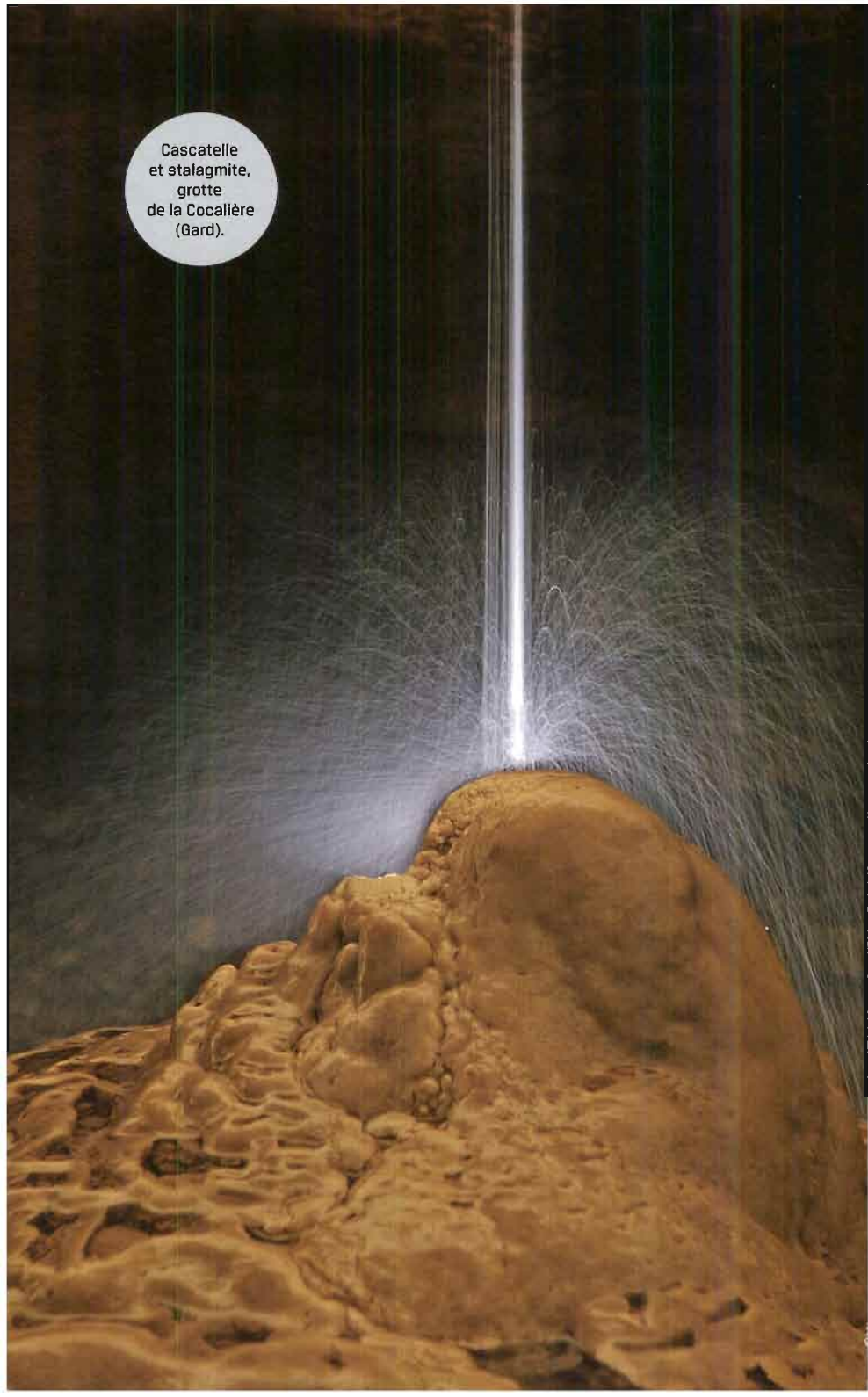
Jean Margat
Thierry Ruf

**Les
eaux
souterraines
sont-elles
éternelles**



90
clés pour
comprendre
les eaux
souterraines

Cascatelle
et stalagmite,
grotte de la
Cocalière
(Gard).



Les eaux souterraines sont-elles éternelles ?

90 clés pour comprendre les eaux souterraines

Dans la même collection

Tous les champignons portent-ils un chapeau ?

90 clés pour comprendre les champignons
Francis Martin, 2014, 184 pages

Pourrons-nous vivre sans OGM ?

60 clés pour comprendre les biotechnologies végétales
Yvette Dattée, Georges Pelletier, coordinateurs
2014, 144 pages

Mais que fait donc ce gendarme dans mon jardin ?

100 clés pour comprendre les petites bêtes du jardin
Patrice Leraut
2014, 160 p.

Une mer propre, mission impossible ?

70 clés pour comprendre les déchets en mer
François Galgani, Isabelle Poitou, Laurent Colasse, 2013, 176 p.

Les chauves-souris ont-elles peur de la lumière ?

100 clés pour comprendre les chauves-souris
François Prud'homme, 2013, 208 p.

Les oiseaux ont-ils du flair ?

160 clés pour comprendre les oiseaux
Luc et Muriel Chazel, 2013, 240 p.

Le jardin suit-il des modes ?

90 clés pour comprendre les jardins
Yves-Marie Allain, 2013, 136 p.

Le sel pousse-t-il au soleil ?

120 clés pour comprendre le sel
Pierre Laszlo, 2012, 128 p.

Un crapaud peut-il détecter un séisme ?

90 clés pour comprendre les séismes et tsunamis
Louis Géli, Hélène Géli, 2012, 176 p.

Éditions Quæ

RD 10

78026 Versailles Cedex, France

© Éditions Quæ, 2013

ISBN 978-2-7592-2190-5

ISSN 2261-3188

Table des matières



Introduction	7
L'eau invisible	9
L'eau active	43
L'eau utile	71
L'eau fragile	111
Bibliographie	145
90 clés pour comprendre les eaux souterraines	148
Crédits iconographiques	152





Introduction

Parce qu'elles sont invisibles, associées aux mystères du monde souterrain et qu'elles se manifestent seulement par les sources, les puits et les fonds de quelques cavernes, les eaux souterraines sont les eaux de la nature les plus sujettes à questionnements et idées reçues : sur leur origine, l'art de les détecter, de les atteindre et de les extraire, leur disponibilité, leurs vertus et leurs défauts. Y répondre est l'ambition de ce livre écrit sous l'angle des sciences de l'environnement et des sciences humaines. Il s'adresse aux curieux comme aux étudiants, à tous ceux désireux d'en savoir plus sur ce vaste sujet. De l'eau sous nos pieds, il y en a partout, car c'est l'un des constituants du sol et du sous-sol. Rappelons que le sol est à la fois la surface où tombe la pluie et la couche de terre arable ou caillouteuse dans laquelle s'enracinent toutes les plantes, fouissent nombre de bestioles, que retournent éventuellement les charrues et à travers laquelle s'infiltré l'eau qui vient directement du ciel ou indirectement de l'écoulement superficiel. Le sous-sol peut être considéré d'abord dans sa proximité avec le sol, comme la base naturelle de la formation de celui-ci et, par extension, l'ensemble des éléments géologiques caractéristiques de la croûte terrestre.

Dans le sous-sol, des nappes se forment et constituent des flux en eau que les hommes cherchent à repérer sous leurs pieds et, s'ils ont les moyens d'y accéder, à puiser. Intuitivement d'abord, puis grâce aux expériences ponctuées de réussites et d'échecs, scientifiquement enfin avec des moyens de repérage systématiques, les hommes ont progressé dans la

connaissance des eaux sous leurs pieds. Ainsi, sols et sous-sols sont étroitement liés par la présence et la circulation des eaux du sol au sous-sol et, inversement, par la dynamique des sources naturelles et des prélèvements artificiels organisés par l'homme. En outre, il est aussi important de comprendre où va l'eau souterraine que d'où elle vient.

Les questions ont été regroupées dans quatre parties reflétant les caractères de l'eau souterraine et les façons dont les sociétés humaines se la représentent, la comprennent, l'emploient et n'en mesurent pas tous les risques : l'eau invisible, l'eau active, l'eau utile et l'eau fragile. Dans chaque partie, les questions formulées de manière simple apportent des réponses tenant compte de l'état des connaissances actuelles dans différents domaines allant des sciences de l'eau – l'hydrogéologie et l'hydrologie – aux sciences politiques en passant par l'histoire et la géographie, l'écologie et l'agronomie, la sociologie et l'économie.

**Génie bâtisseur
cherchant de l'eau
sous terre, musée
des Karez, Turfan
(Chine).**





L'eau

invisible

1 Tous les sols contiennent-ils de l'eau ?

Les sols reçoivent de l'eau provenant de différents flux, et une partie de l'eau arrivant dans le « compartiment » sol y est retenue. Ainsi, la pluie qui tombe sur le sol (voir l'encadré p. 11) circule de plusieurs manières : une partie reste en surface et participe aux écoulements naturels ; l'autre partie s'infiltre dans le sol, qui en retient une part importante. L'humidité du sol évolue donc en fonction des entrées et des sorties d'eau (essentiellement l'évapotranspiration). Si le sol est saturé, il ne peut plus contenir de nouveaux apports d'eau. L'eau descend alors progressivement dans le sous-sol et peut rejoindre la nappe d'eau souterraine si elle existe, contribuant aux écoulements souterrains à l'origine des sources.

L'eau peut arriver dans un sol par d'autres flux que la pluie, lorsque des écoulements superficiels naturels proviennent de

zones situées en amont, ce qui peut produire des inondations. Les écoulements superficiels peuvent aussi être artificiels, liés aux interventions humaines de captation, de transfert et d'épandage des eaux d'irrigation. Dans ce cas, la connaissance des capacités de rétention du sol est essentielle pour éviter que les apports d'eau ne les dépassent. Le surdosage d'irrigation, en dehors de son surcoût économique, provoque le lessivage des éléments fertilisants (en particulier l'azote) et la pollution des nappes phréatiques en entraînant des molécules dangereuses pour l'environnement, en particulier les herbicides et pesticides utilisés dans des agricultures conventionnelles.

Des apports d'eau moins connus contribuent aussi à la dynamique de rétention d'eau dans le sol : d'une part, la condensation de l'eau sur le sol ou sur les plantes apporte des quantités limitées mais non négligeables dans certaines conditions et certaines saisons ; d'autre part, lorsque la nappe phréatique est très proche du sol, elle contribue à alimenter la réserve en eau du sol par des remontées capillaires. Dans des situations extrêmes où le sol est saturé en eau et que la végétation transpire, la remontée de l'eau jusqu'à la surface provoque des effets très caractéristiques : l'eutrophisation du sol qui ne s'oxygène plus, modifiant fondamentalement l'écologie du lieu et sa biodiversité, et la concentration de sels en surface peuvent déboucher sur une stérilisation complète du milieu. Tous les sols contiennent de l'eau mais deux extrêmes sont à éviter, pour ceux qui les gèrent : le réservoir du sol ne doit ni être toujours saturé, ni évidemment jamais alimenté.

La capacité du réservoir du sol est liée à sa texture (la composition en argile, limon et sable) et à sa structure. Plus il y a de vides dans le sol, plus l'eau peut s'y insérer. Encore faut-il qu'elle y reste suffisamment de temps pour que la vie biologique s'y développe, aussi bien pour les micro-organismes fabriquant le sol que pour les plantes qui s'y trouvent. Deux critères sont importants : les capacités de rétention d'eau et de restitution de l'eau.

La réserve en eau utile dans un sol résulte de la différence entre la teneur en eau à la capacité de rétention et la teneur en eau au point de flétrissement des plantes, lorsque le métabolisme racinaire ne peut plus fonctionner. Évidemment, cette réserve dépend aussi de l'épaisseur du sol considéré et de la profondeur de l'enracinement. D'une manière générale, la dynamique la plus favorable aux organismes vivants est une

réserve oscillant entre la saturation sans son dépassement, et un seuil où la physiologie des êtres vivants n'est pas atteinte par le manque d'eau. En agriculture, on parle de « réserve en eau facilement utilisable » par les plantes pour gérer le mieux possible les flux d'eau dans le réservoir du sol.


Les sols très argileux retiennent beaucoup d'eau dans les micropores qui séparent les billes d'argiles, mais la force nécessaire pour extraire cette eau et la transférer dans les racines est élevée. À l'inverse, les sols sableux ont une faible capacité à retenir de l'eau mais la force d'extraction est nettement plus faible que dans les sols argileux. Les sols limoneux ont la meilleure différence entre la capacité de rétention au champ et le point de flétrissement permanent.

On mesure la pluie par la hauteur d'eau qu'elle apporte sur la surface terrestre. Selon les endroits du globe, cette hauteur annuelle varie de quelques millimètres par an (il s'agit alors souvent de la rosée) à quelques mètres par an (il s'agit alors souvent de pluies intenses).

Si on excepte les zones les plus extrêmes, hyperarides ou hyper-humides, la fourchette varie (dans le temps et dans l'espace) entre 50 et 2 000 millimètres en année moyenne.

En France, pays tempéré et régulièrement pluvieux, la hauteur d'eau tombant sur le sol est, en année moyenne, entre 500 et 800 millimètres avec des variations interannuelles et quelques exceptions au-dessus ou en dessous de ces valeurs.

Pour se représenter le volume d'eau qui arrive sur le sol, prenons une pluie journalière très moyenne de 10 mm : cela correspond à un volume de 10 000 m³ d'eau tombée sur 1 km², ou encore un apport de 100 m³ par hectare. Ainsi, en France, le volume d'eau des précipitations annuelles s'élève en moyenne de 500 000 à 800 000 m³/an/km². Que devient cette masse considérable d'eau ? Le sol reçoit la pluie, dont une part s'écoule en surface, une autre s'évapore directement et une troisième s'infiltre. La part d'eau qui s'infiltre dans le sol va aussi évoluer selon trois dynamiques : une part est retenue dans le sol, où elle se lie fortement aux composants du sol. Une autre est aussi retenue dans le sol, sans être totalement fixée, et va contribuer à la vie des multiples micro-organismes et organismes animaux et végétaux dont le métabolisme consomme de l'eau. Une troisième part descend plus bas, dans le sous-sol, jusqu'à parfois de très grandes profondeurs, à travers les fractures et les microfractures de roches d'origines très variées, sédimentaires, métamorphiques ou volcaniques. Elle finit souvent par être piégée à certaines profondeurs lorsqu'une couche géologique est suffisamment imperméable.



Masses
et parcours
de l'eau
de pluie

2 Quelle place occupe l'eau dans le sous-sol ?

Les roches très variées qui constituent le sous-sol forment, selon leur nature, soit des réservoirs ou des conducteurs d'eau souterraine, soit des obstacles au déplacement de l'eau. En effet, les roches ont deux propriétés vis-à-vis de l'eau : la porosité et la perméabilité.

- La porosité est un caractère géométrique et volumétrique : c'est la proportion, dans la roche, de vides pouvant contenir de l'eau ou de l'air – seulement de l'eau quand la roche est saturée.

- La perméabilité d'une roche est l'aptitude à permettre, en milieu saturé, le mouvement de l'eau à travers les pores ou les fissures interconnectées, sous l'effet d'une différence de pression. Ce caractère hydrodynamique s'exprime par une vitesse moyenne de déplacement de l'eau en fonction de la pente d'écoulement souterrain. Une roche comme l'argile peut être à la fois très poreuse et très peu perméable.

Les roches les plus perméables, bonnes conductrices d'eau souterraine, sont les sables, les alluvions graveleuses, les grès, les conglomérats peu cimentés, la craie et les calcaires bien fissurés ou même karstiques, les cendres volcaniques, les roches granitiques ou volcaniques bien fracturées. Lorsqu'elles contiennent de l'eau, elles sont dites « aquifères », c'est-à-dire « porteuses d'eau » mobile ou mobilisable. Au contraire, les argiles, le sel ou le gypse, les schistes, les roches cristallines peu fracturées sont dépourvues d'eau souterraine mobilisable et forment les limites des aquifères.

Dans les roches poreuses ou fissurées saturées, les molécules d'eau ont trois manières d'exister :

- quand l'eau participe à la composition de certains minéraux constitutifs des roches, dits « hydratés », notamment les minéraux argileux, on l'appelle « eau de constitution » ;
- des molécules d'eau fixées par adsorption aux parois solides du milieu rocheux sont dites « hygroscopiques » ou « pelliculaires » ;
- des molécules d'eau peuvent être attachées à la roche par capillarité.

L'ensemble de ces eaux piégées forme l'eau de rétention, en pratique immobile dans la roche, dont la proportion par rapport

à l'eau gravitaire (celle qui peut se déplacer) est d'autant plus grande que la porosité est fine. Ainsi, les roches argileuses dites imperméables contiennent très peu d'eau gravitaire mais des quantités non négligeables d'eau de rétention, tandis que dans les roches perméables, c'est l'eau gravitaire qui domine, circule et peut être mobilisée. Dans les roches argileuses, la quantité d'eau de rétention fixée dans les roches en proportion de leur volume peut varier de moins de 1 % jusqu'à 20 %.

3 Quelles sont les particularités des eaux souterraines ?

On peut dresser des typologies des eaux souterraines en fonction de leurs caractéristiques statiques et dynamiques, de leurs origines, de leurs âges, de leurs compositions et de leurs degrés d'utilisation. L'origine et la mobilité de l'eau sont des critères déterminants.

Les eaux gravitaires sont à l'origine des aquifères à des profondeurs diverses, formant des réserves souterraines parfois très étendues et épaisses de plusieurs mètres à dizaines de mètres. La nappe phréatique se trouve dans l'aquifère le plus proche du sol, mais des aquifères plus profonds peuvent exister. Les nappes les plus profondes peuvent être connectées aux nappes supérieures mais la lenteur de cette connexion et l'origine ancienne de l'eau expliquent cette appellation de « nappes fossiles ».

Certaines eaux souterraines sont immobiles, intégrées et fixées aux roches. D'autres sont figées par le gel intense du sous-sol proche de la surface. Ces formations sont appelées pergélisol en français, permafrost en anglais. Elles couvrent la moitié des terres du Canada ou de la Russie et la très grande majorité du Groenland et de l'Antarctique.

Les compositions chimiques de l'eau souterraine ont également de l'importance. Il faut bien entendu distinguer les eaux douces des eaux saumâtres ou des eaux salées. La température est une donnée majeure, surtout si les eaux sont directement utilisées par l'homme, par exemple les sources thermales (voir question 54).

Parmi les autres caractéristiques des eaux souterraines, on retiendra aussi des critères d'étendue et de volume de la nappe, qui font l'objet d'estimations mais aussi de mesures

de suivi régulier, le caractère exploitable ou non exploitable par l'homme, le phénomène de surexploitation éventuel et le caractère renouvelable ou non renouvelable de la ressource dans ce contexte, l'importance des pollutions naturelles ou induites.

4 Quels sont les échanges entre l'eau et le sol ?

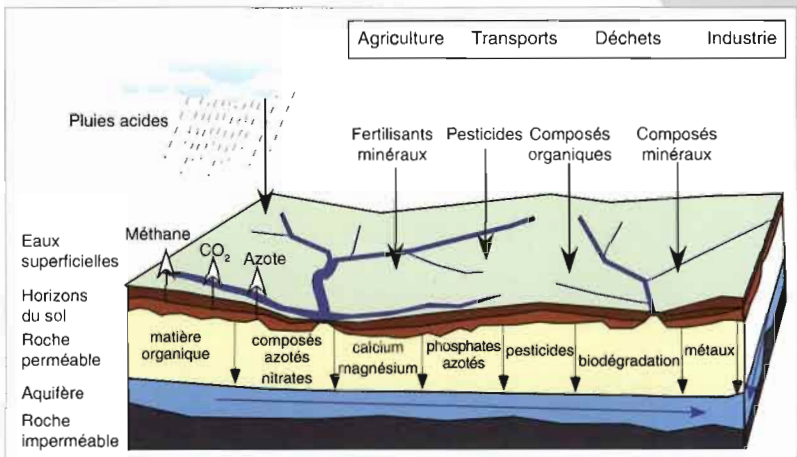
L'évaporation, l'infiltration et la transpiration des plantes induisent de nombreux échanges verticaux entre l'atmosphère et le sol, et entre le sol et le sous-sol (fixation, rétention). De plus, parce que l'eau se déplace aussi latéralement, des échanges existent entre des espaces proches ou distants. L'érosion d'un versant provoqué par des pluies et des ruissellements violents se traduit par des transferts de matériaux et leur épandage sur d'autres sols, qu'ils contribuent à enrichir d'éléments organiques et minéraux. L'exemple le plus connu est l'arrachement par le Nil bleu des limons d'Éthiopie qui, après un parcours de 5000 kilomètres, bonifient les terres d'Égypte grâce à l'étalement de la crue organisée au moyen de digues et de chenaux : la sédimentation, influencée par les riverains du Nil, a duré cinq millénaires. La construction en 1964 du haut barrage d'Assouan a mis fin à ce phénomène en Égypte, mais il se poursuit largement au Soudan, où une sorte de delta intérieur se forme, année après année. En Égypte, le sol ancien est devenu le sous-sol du sol actuel du seul fait des transferts d'eau et de matériaux.

D'ailleurs, les agronomes du XIX^e siècle considéraient que l'un des intérêts primordiaux de l'irrigation, avant même la réponse à des périodes de sécheresse saisonnière, était la création de sols là où il n'y en avait pas, ou alors un sol très peu fertile. Durant des siècles, les berges de la Seine ont été irriguées dans le but de constituer des sols nouveaux, et le premier traité moderne d'irrigation (William Tatham, 1799) a été écrit en vue d'un usage en Angleterre. Il reprenait les principes d'organisation cévenols où la terre et l'eau étaient cogérées pour créer des terrasses et de véritables hydrosystèmes communs entre les hommes. Le limonage des terres par les apports d'eau est également l'axe de l'aménagement en Provence. La plaine de la Crau, auparavant constituée de couches de sédiments grossiers

apportés par les crues de la Durance (qui a changé de cours en se jetant dans le Rhône pendant la glaciation du Würm, il y a dix-huit mille ans), est arrosée depuis le xvi^e siècle par le canal de Craponne : le sous-sol de la Crau, formé d'amas de galets, a été recouvert du limon charrié par les eaux du canal, épandu en submersion dans les champs et entretenu selon le principe d'une lame d'eau qui facilite à la fois l'infiltration et la sédimentation. En Camargue, au xix^e siècle, des sociétés industrielles de limonage furent constituées pour mettre en valeur des zones auparavant drainées puis protégées des grandes crues du Rhône par les digues construites sous Napoléon III. C'est l'origine des grandes propriétés terriennes actuelles, qui appartiennent à des sociétés comme Pernod-Ricard.

En dehors de la circulation sédimentaire, l'eau arrivant sur le sol et entrant dans le sol et le sous-sol transporte ce qui est immédiatement soluble et ce qui se fixe sur les particules en mouvement dans l'eau. Aux éléments organiques issus de la biosphère, s'ajoutent les composés issus des activités humaines industrielles, agricoles, urbaines. Parfois, les pollutions atmosphériques sont aussi entraînées vers le sol par les pluies, qui deviennent acides au cours de leur chute. Les activités agricoles amènent leurs lots de fertilisants, de pesticides et de composés organiques (composts, lisiers et fumiers), que l'eau redistribue dans les horizons du sol et évacue vers les nappes phréatiques quand ces horizons sont saturés. Une partie des nitrates comme des pesticides finit par migrer vers le bas. Du côté des déchets urbains, industriels, et

Principaux échanges entre l'atmosphère et le sous-sol.



des accidents des transports, des métaux, des solvants, des hydrocarbures et même des radionucléides entraînés par les eaux superficielles et d'infiltration rejoignent le sous-sol. Après un laps de temps variable, une part de ces polluants se retrouve dans la première nappe d'eau qu'ils rencontrent sur leur trajet. Les sels naturels entrent aussi dans l'eau du sol et du sous-sol. Leur migration peut modifier les états de surface du sol, notamment quand les remontées capillaires de l'eau sont fortes.

Le niveau de pollution des nappes est inquiétant, d'autant plus que le processus d'échange est cumulatif : la reconstitution des qualités originelles des eaux souterraines prend beaucoup plus de temps que leur pollution.

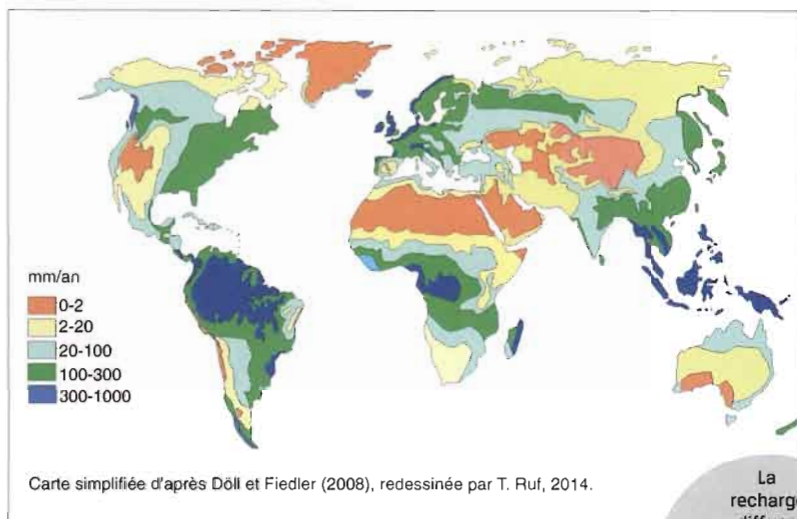
5 Quelles régions du monde sont les plus riches en eaux souterraines ?

La richesse en eau souterraine dépend à la fois de la nature du sous-sol, du nombre et de l'étendue des aquifères et de l'abondance des apports qui les alimentent.

Si l'on considère les eaux souterraines dont le renouvellement est important et continu, les régions les plus riches sont celles qui bénéficient à la fois d'un climat assez pluvieux, tempéré ou intertropical, et d'un sous-sol bien pourvu en terrains perméables : larges vallées remplies d'alluvions, plaines et plateaux calcaires en piémont de reliefs bien arrosés, où l'alimentation des eaux souterraines peut atteindre en moyenne plusieurs centaines de milliers de mètres cubes par an et par kilomètre carré.

Dans le bassin amazonien, les cours d'eau entretiennent une abondante eau souterraine.





La recharge diffuse (par la seule infiltration des pluies) des nappes d'eau souterraines entre 1961 et 1990.

Parmi les domaines particulièrement riches en eau souterraine dans le monde, les Philippines détiennent le record mondial avec une infiltration en sous-sol de $600\,000\text{ m}^3$ d'apport moyen annuel/an/km², suivi de certaines régions d'Indonésie, de la vallée du Gange en Inde, du bassin du Congo en Afrique centrale, des plaines côtières atlantiques aux États-Unis et de la côte pacifique au Canada, de l'isthme de Panama et de la côte pacifique du sud de la Colombie et du nord de l'Équateur, du bassin amazonien au Brésil.

En zone sous climat relativement aride, des vallées peuvent être assez riches en eau souterraine lorsqu'elles sont parcourues par des fleuves provenant de zones humides. En effet, ceux-ci charrient de grandes quantités d'alluvions et entretiennent de vastes nappes d'accompagnement, comme la vallée du fleuve Jaune en Chine, la vallée du Nil en Égypte, celle de l'Indus au Pakistan, ou celle de l'Amou Daria en Ouzbékistan.

Cependant, la « richesse » en eau souterraine disponible ne dépend pas seulement de l'abondance de l'alimentation des nappes souterraines, mais aussi de leur part mobilisable dans des conditions économiques acceptables et sans impact indésirable sur des cours d'eau ou des écosystèmes subordonnés pour lesquels des débits sont réservés. En effet, des réserves peu ou non renouvelables – c'est le cas dans plusieurs régions arides d'Afrique et du Moyen-Orient – sont comparables à une richesse minière en gaz ou en pétrole : c'est un capital qui ne se consomme qu'une fois...

6 Quels sont les endroits les plus arides de la planète ?

À proprement parler, un climat, une région, un espace géographique peuvent être arides et une saison peut être sèche. On peut avoir des zones arides avec une saison pluvieuse et des zones humides avec une saison sèche.

Les régions les plus arides du monde sont évidemment situées là où il pleut le moins. À moins de 200 millimètres de pluie tombée par an, la vie devient difficile, mais pas impossible. En fait, le degré d'aridité d'une région dépend de bien d'autres facteurs, comme les températures, la capacité du sol à retenir l'eau, et bien sûr la présence d'eaux souterraines. Si le froid est extrême et les gelées longues et intenses, la végétation est détruite par le double effet des éléments contraires à son développement : pas suffisamment d'eau dans l'absolu, et quand de l'eau est disponible à l'état liquide, elle manque aux autres étapes de la croissance des plantes.

Quand la chaleur est extrême, le métabolisme des êtres vivants est entravé, l'évaporation rapide de la moindre eau tombée ou condensée à la surface du sol limite l'émergence de populations végétales ou animales. Il existe toutefois des manifestations extraordinaires de reprise de vie dans certains déserts très arides lorsque de violentes précipitations adviennent. Ainsi, le désert du Kalahari partagé entre l'Afrique du Sud, la Namibie et le Botswana est célèbre pour des épisodes de reverdissement brutal après des pluies torrentielles mais brèves.

Paradoxe assez général, les zones les plus arides du monde peuvent subir des inondations catastrophiques. C'est pourquoi les peuples autochtones des zones arides savent très bien comment vivre en condition de rareté absolue, mais aussi comment éviter d'être surpris par des crues brutales. Voire comment domestiquer partiellement celles-ci en organisant des épandages, dont le but est à la fois de donner une humidité suffisante à la surface du sol pour cultiver des céréales résistantes, mais souvent aussi de contribuer à recharger la nappe d'eau invisible qui se cache sous le désert. Dans le cas des déserts, la différence se joue en fonction de la présence ou l'absence d'eau souterraine à faible profondeur, accessible par l'homme avec les moyens techniques et organisationnels de son époque.

Les zones les plus arides du monde qui disposent d'eau souterraine permettant les cultures ont néanmoins l'avantage d'être en grande partie indemnes de maladies liées à des organismes parasites qui nécessitent l'humidité atmosphérique. Elles constituent également des îlots de biodiversité spécifique.

7 Comment savoir s'il y a de l'eau sous terre ?

Depuis la nuit des temps, l'homme recherche de l'eau pour assurer sa survie et développer ses activités. Très tôt, le recours à l'eau souterraine s'est avéré préférable à l'utilisation d'eau ayant circulé longtemps en surface et impropre à la consommation du fait de sa turbidité, de son état chimique ou bactériologique. Bien entendu, l'eau des sources naturelles a fait l'objet d'appropriations anciennes. Une grande partie de la localisation de l'habitat s'explique par la qualité et la proximité d'eaux qui sortent de terre. Mais, dans les zones du monde privées de ces avantages, il faut chercher d'autres manières d'accéder à l'eau souterraine. Cette quête s'est en particulier développée lorsque la nécessité d'arroser les cultures est apparue dans des régions où l'usage des eaux superficielles était déjà important sous la gouverne d'organisations collectives.

Dans un contexte de rareté d'eau, la stratégie de certaines personnes ou certains groupes de personnes consiste à quitter le cadre de la gestion collective de l'eau de surface, dont les caractéristiques sont jugées trop contraignantes. Bref, chercher de l'eau souterraine est une vieille activité humaine sous des motifs très variés, fondés sur des coopérations ou au contraire des compétitions et des défis.

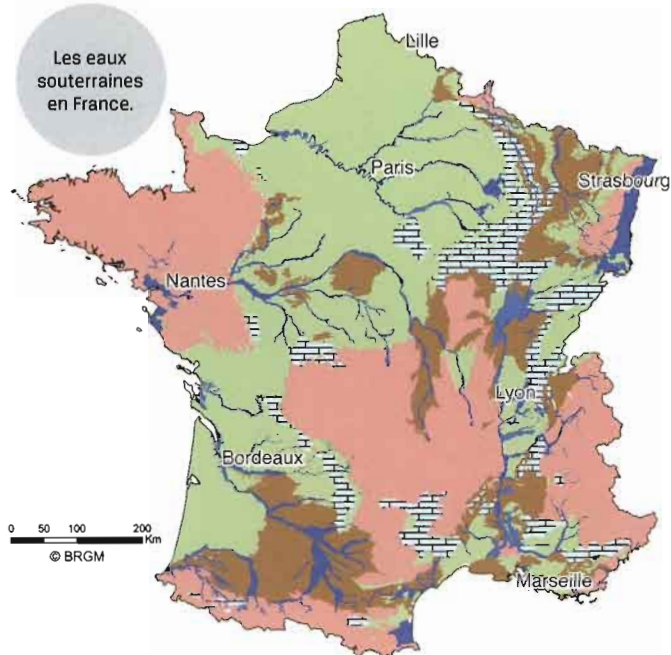
Les indices pour découvrir de l'eau souterraine et y accéder dépendent des techniques et des savoirs. Soit l'eau recherchée est identifiée à la verticale du point où elle peut être employée et pour l'usage à laquelle on la destine : il faut alors établir un puits et éventuellement un mécanisme d'élévation de l'eau profonde si l'eau ne sort pas de manière artésienne. Soit l'eau souterraine recherchée se trouve à une certaine distance et à une altitude un peu plus élevée que le point où elle va être utilisée mais, pour la transférer, il faut établir une galerie (voir question 68).

Trouver de l'eau souterraine à grande distance du lieu d'utilisation et s'assurer qu'on peut la transférer par gravité au moyen d'une mine est un exercice encore plus délicat. Si le creusement vain d'un puits sur quelques mètres ou quelques dizaines de mètres est dommageable, l'établissement d'une galerie longue de plusieurs centaines de mètres à plusieurs kilomètres, aérée par des dizaines voire des centaines de puits verticaux de visite, s'il s'avère inefficace, conduit à une crise majeure entre les concepteurs, les organisateurs et les travailleurs de la galerie. Au début du XI^e siècle, El Karaji écrit à Bagdad, en langue arabe, le *Traité des eaux cachées*, qui rassemble toutes les connaissances nécessaires pour créer de tels ouvrages dans des sites appropriés, mais aussi pour faire accepter l'idée de plusieurs galeries en fixant les conditions de voisinage et de compatibilité par rapport à la ressource convoitée. Ce texte, traduit et publié en français par l'université de Nice en 1973 et commenté par Mohammed El Faiz (2005) dans *Les maîtres de l'eau, histoire de l'hydraulique arabe*, fait le lien entre les savoirs antiques sur les eaux souterraines et l'hydrogéologie moderne.

8 Où sont les ressources d'eau souterraine en France ?

Les Français ont de la chance puisque, sous leurs pieds, une nappe d'eau souterraine est souvent présente. Il faut dire que le climat s'y prête bien, avec des pluies régulières qui durent assez longtemps pour qu'une part notable de l'eau s'infiltre dans le sol et le sous-sol. En France, on chiffre les aquifères à plus de 6500, et ils se rechargent chaque année avec 100 milliards de mètres cubes d'eau, dont 20 milliards peuvent être extraits sans modifier radicalement les écoulements des rivières en surface. Selon les régions, les nappes sont libres ou captives. En Bretagne, où les roches granitiques sont fracturées, l'eau suit les vides créés dans la masse rocheuse. Les bassins parisien et aquitain sont connus pour bénéficier d'aquifères multicouches avec des nappes captives disposées sous les nappes libres plus proches de la surface. Les régions disposant des eaux souterraines les plus abondantes sont la plaine d'Alsace, les plateaux du Jura, des Causses et du Vaucluse et, de la Normandie à l'Artois, les plaines crayeuses.

Les eaux souterraines en France.



- Ressources abondantes et accessibles, très dépendantes des eaux de surface (nappes alluviales)
- Ressources abondantes et accessibles, des nappes phréatiques étendues (aquifères de la craie, des sables, des grès et des calcaires) avec nappes profondes assez générales.
- Ressources abondantes mais inégalement accessibles et souvent profondes dans les terrains calcaires caverneux. Domaine des sources majeures, avec quelques rivières souterraines localisées.
- Ressources inégales et localisées. Petites sources nombreuses.
- Ressources réduites ou nulles. Domaine non aquifère. Quelques nappes profondes locales.

9 Y a-t-il autant d'eau sous les continents que dans les océans ?

Il y a 60 fois moins d'eau sous les continents que dans les océans. Le volume global de l'eau libre des océans et des mers de la planète est de 1338 millions de km³. (1 km³ = 1Md m³ soit le volume du lac d'Annecy.) En outre, les eaux gelées de l'Antarctique et du Groenland sont estimées à 24 millions de km³. Les eaux souterraines continentales représentent environ le même volume que les glaces du globe, entre 20 et 25 millions de km³, mais elles comptent, au moins pour moitié, des eaux saumâtres ou salées, et aussi des eaux gelées souterraines (permafrost) situées surtout en Sibérie, au Canada et en Alaska (300 000 km³). La partie la plus profonde des eaux souterraines continentales, celle qui va jusqu'à 100 mètres de profondeur, contiendrait entre 3 et 5 millions de km³.

De l'eau sous l'Antarctique

La particularité de l'Antarctique est de ne pas posséder de sol. Sous la surface essentiellement constituée d'eau congelée, il y a une épaisseur notable de glace jusqu'au socle rocheux, et dans la roche sous-glaciaire, il y a de l'eau en quantité très incertaine, liquide en profondeur. Sa répartition, liée à la nature des roches en partie sédimentaires qui constituent ce continent masqué, est problématique.

Le sous-sol de l'Antarctique, sous sa carapace de glace de près de 22 millions de kilomètres cubes, pourrait contenir 2 millions de kilomètres cubes d'eau, dont la moitié d'eau douce, qui doit être en très grande partie « fossile » (voir questions 10 et 21).

10 Quel âge ont les plus anciennes eaux souterraines ?

On définit l'âge d'une eau souterraine extraite en un point donné (notamment à son émergence ou dans un forage) comme le temps écoulé depuis le moment de sa pénétration dans le sous-sol par infiltration. Étant donné les vitesses très variées de déplacement des eaux souterraines et les longueurs très inégales de leurs trajets souterrains, ces âges, ou « temps de parcours », sont nécessairement très différents.

En théorie, on peut soit les calculer d'après la connaissance des aquifères considérés, soit les déduire d'une datation par des analyses isotopiques, par exemple au carbone 14, qui constitue un des chronomètres naturels puisque l'eau n'a plus de contact avec l'atmosphère au cours de son trajet souterrain. On peut trouver, dans des aquifères profonds, loin des aires d'infiltration, des eaux d'âge très ancien : plusieurs dizaines voire centaines de milliers d'années. Plutôt que « fossiles » au sens des géologues, des eaux préhistoriques, en somme. Ainsi, l'eau de la nappe profonde dite des « sables verts » sous Paris doit être âgée d'au moins 40 000 ans : c'est de l'eau de pluie tombée sur les Néandertaliens.

Les isotopes du chlore 36 ou du krypton 81 ont permis de mesurer des âges encore plus anciens pour des eaux très profondes et quasi stagnantes : environ 500 000 ans ou plus d'un million d'années dans le Great Artesian Basin d'Australie et dans l'aquifère profond des grès de Nubie, en Libye. Là c'est bien de l'eau fossile !



La pluie que l'homme de Néandertal a reçue a mis quarante mille ans à rejoindre la nappe profonde des sables verts, sous Paris.

11 Les eaux souterraines sont-elles pures ?

La pureté de l'eau renvoie à l'absence à la fois de matières dissoutes et de matières en suspension. Or les eaux souterraines ont une histoire. Ce qu'elles contiennent est le produit de phénomènes débutant avec les précipitations et se poursuivent un temps en surface, avant de continuer sous la terre, au cours de l'infiltration verticale entre des structures géologiques et du déplacement latéral des masses d'eau.

Au début du parcours, toutes sortes d'éléments chimiques et organiques s'incorporent à l'eau. En passant dans une atmosphère polluée, l'eau de pluie peut être acide et chargée de molécules dissoutes et de particules en suspension. En tombant sur le sol, l'eau ruisselle et intègre tout ce qui est facilement mobile, produit naturel ou venant de l'activité humaine. Les eaux pluviales lessivent donc les surfaces et, en s'infiltrant dans les sols, constituent une sorte de lixiviat composite, parfois très dangereux, y compris pour la faune et la flore du sol, parfois utile lorsque ce qui est dissous et transporté fournit des aliments aux organismes vivant sous terre.

La suite du voyage de l'eau sous le sol est une série contradictoire d'aggravations de la pollution, avec l'élévation des concentrations en éléments indésirables (comme les nitrates, les pesticides, les métaux lourds et bien d'autres molécules que l'homme a lâchées dans la nature), et de filtrations naturelles des éléments non dissous par certaines couches sédimentaires.

Les eaux souterraines très anciennes, souvent très profondes, considérées comme non renouvelables ou très peu renouvelables car constituées il y a des dizaines de milliers d'années, sont généralement très pures, à l'exception de certaines nappes salées. Leur exploitation actuelle représente un enjeu et parfois une source de conflit, par exemple la nappe captive du Néocomien (Crétacé) située à 700 mètres de profondeur et dont la pureté en fait une ressource à préserver pour les générations futures, surtout si toutes les autres ressources en eau deviennent inconsommables, par exemple pour des raisons de guerre atomique. Cela étant, le développement industriel et la fabrication de matériaux électroniques induisent des demandes d'exploitation de ces nappes très pures.

Les eaux souterraines situées à des profondeurs moyennes entre 50 et 200 ou 300 mètres se renouvellent plus souvent, mais elles ont été parfois surexploitées, se chargent en éléments indésirables qui se concentrent par le double effet des apports croissants et de la réduction des volumes. Pour que ces eaux restent pures, il faut organiser une protection des aires d'alimentation de l'aquifère. C'est particulièrement vrai pour les eaux souterraines des massifs karstiques, car la circulation de l'eau y est très rapide. L'eau y est peu filtrée par les couches sédimentaires mais circule plutôt dans les anfractuosités de la roche, de poche en poche jusqu'aux exutoires, sources et résurgences. Dans ces situations, une eau très pure sortant d'un dédale souterrain peut devenir très chargée en matériaux lors de grandes pluies d'orage. Elle ne redevient pure qu'après de longs jours de retour au calme à l'intérieur des poches et des chenaux souterrains.

Enfin, les eaux souterraines qui sourdent ou qui jaillissent (voir question 66) et ont été considérées par les sociétés humaines comme très pures font l'objet d'attention et de rituels dans toutes les religions. Très souvent, ces eaux sont devenues des symboles de fertilité, de bonheur ou de réussite pour les personnes qui les ont touchées. Si elles ont des caractères naturels particuliers, en température et en éléments dissous importants, comme les bicarbonates, les sulfures ou des oligoéléments, l'idée de pureté est associée aux thérapies possibles, aux effets bénéfiques pour la santé (voir question 53).

12 L'eau souterraine est-elle différente de l'eau de surface ?

En tant que ressources, les eaux souterraines et les eaux de surfaces diffèrent beaucoup par leur répartition, leur accessibilité, les conditions de leur maîtrise et de leur exploitation... Ces différences expliquent que les unes et les autres ont été longtemps les objets de sciences séparées : l'hydrologie ne s'intéressant qu'aux eaux de surface tandis que les eaux souterraines étaient du ressort de l'hydrogéologie. De même, leurs gestions sont restées longtemps l'apanage d'administrations publiques distinctes : autrefois, les Ponts et chaussées pour les grands cours d'eau, le Génie rural pour les petits cours d'eau et le Service de mines pour les eaux souterraines. Mais ces

Qu'est-ce que l'hydrogéologie ?

L'hydrogéologie permet de combiner différentes approches venant des sciences de la Terre et des sciences de l'eau. Les connaissances produites par la combinaison des analyses géologiques et géographiques, des calculs hydrologiques sur les bassins versants (les espaces d'écoulement de l'eau de pluie délimités par les lignes de crête), des relevés et des observations de terrain permettent, non seulement de repérer les grandes nappes d'eau souterraines, mais aussi d'évaluer leur dynamisme naturel, leur potentialité d'utilisation pour des activités humaines et, si ces activités sont déjà développées, le risque de surexploitation éventuelle. Un des paramètres incontournables de l'hydrogéologie moderne est la mesure des niveaux d'eau des puits que l'on appelle niveaux piézométriques. Si on dispose de relevés bien répartis spatialement et, aux mêmes points, de l'altitude du fond imperméable qui retient la nappe d'eau, on peut modéliser la forme et le volume de la nappe à un instant précis et suivre son évolution au pas de temps des données disponibles. Cette approche peut fournir des documents d'analyse et de prospective sur l'évolution de la nappe en fonction de certains scénarios et hypothèses.

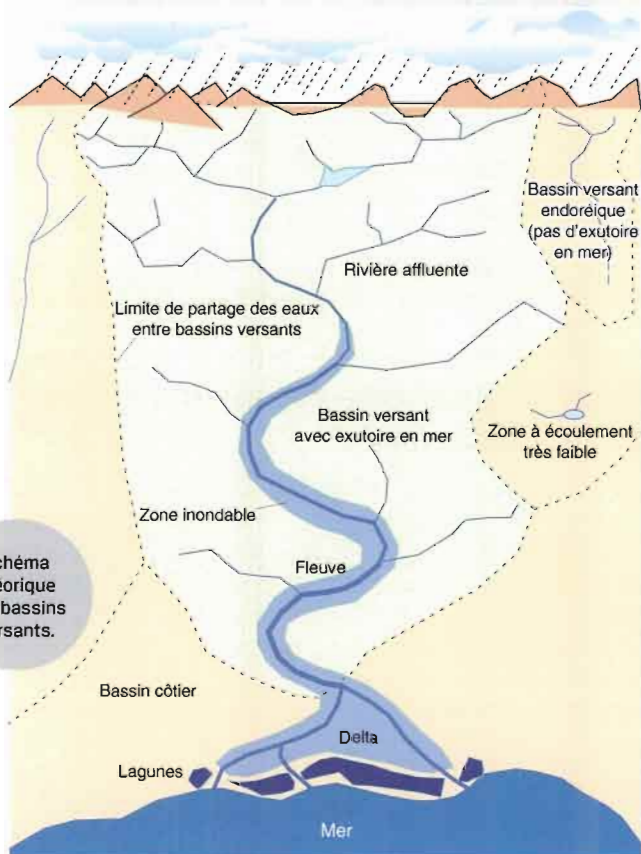


Schéma théorique des bassins versants.

répartitions de responsabilités sont maintenant bien atténuées et l'interdépendance des eaux superficielles et souterraines est mieux comprise.

En effet, les mêmes eaux sont tour à tour superficielles et souterraines. Les unes et les autres ne diffèrent pas en nature, mais seulement à un moment donné ou en moyenne, par leur position, leur mode de circulation et le régime de leurs variations, ainsi que par leurs volumes instantanés respectifs dans un espace continental donné ; elles diffèrent aussi par les gammes de leurs qualités respectives et de leurs vulnérabilités à des pollutions ponctuelles ou régionales du fait de leurs différents degrés de résilience (capacité d'autoépuration), celle des eaux souterraines étant généralement plus faible.

La principale différence tient au fait que, dans les eaux de surface, les flux d'eau courante (fleuves et rivières) et les stocks (lacs et étangs) sont connectés mais bien séparés – les flux étant l'essentiel. Tandis que pour les eaux souterraines, c'est le contraire : les flux et les stocks occupent les mêmes milieux – les aquifères – et ce sont les stocks qui dominent.

13 Y a-t-il de la vie dans les eaux souterraines ?

Comme dans le sol et le sous-sol, des formes de vie existent dans les eaux souterraines. Un des organismes vivants les plus célèbres est un vertébré amphibien cavernicole aveugle, le protége, découvert en Carniole (aujourd'hui Slovénie) au XVII^e siècle, mais malheureusement en voie de disparition.



Un protége dans une eau souterraine en Slovénie.

Les nappes souterraines peu profondes, notamment dans les aquifères alluviaux reliés aux rivières permanentes, hébergent souvent une microfaune variée – bactéries, vers... – et même des insectes, de petits crustacés et des mollusques qui peuvent transiter entre l'eau de rivière et l'eau souterraine. Ces habitants de l'eau souterraine ne nuisent pas à sa qualité, dont ils sont même des indicateurs et des facteurs d'autoépuration. En France, par exemple, la nappe souterraine des alluvions de la vallée du Rhône forme un véritable écosystème où vit une riche faune interstitielle : 28 espèces stygobies, crustacés principalement, mais aussi quelques ostracodes et mollusques, et même un coléoptère, y ont été dénombrés. L'eau souterraine peut également abriter une vie microbienne, notamment des bactéries, même dans les aquifères profonds, où elle est un facteur de processus hydrochimiques, comme la dénitrification ou l'oxydation.

14 Quelle eau « boivent » les plantes ?

Pour que leur croissance végétale s'opère, les plantes, dans leur grande majorité, boivent l'eau du sol accessible à une profondeur allant de quelques centimètres à un mètre. Certaines espèces ont la capacité de capter plus profondément de l'eau, même dans le sous-sol, avec des racines de plusieurs mètres. Celles-ci peuvent intercepter de l'eau descendant vers la nappe, mais il arrive que des racines profondes arrivent à proximité de la nappe phréatique. Dans les oasis anciennes, c'est le cas des palmiers dattiers, qui survivent longtemps même si on ne les arrose pas, lorsque la nappe est accessible par leur système racinaire. Dans des circonstances très différentes, lorsqu'il y a excès d'eau et remontée de la nappe phréatique à proximité du sol, les plantes peinent à utiliser l'eau abondante parce qu'il y a asphyxie et destruction des racines noyées.

Toutes les plantes rejettent l'eau utilisée dans l'atmosphère par évapotranspiration. Les appareils végétatifs des plantes condensent aussi de l'eau sous forme de rosée nocturne ou matinale qui tombe sur le sol, y pénètre sur quelques centimètres, ce qui offre un complément d'eau accessible aux racines de différentes plantes, là où le phénomène se produit.

Dans les zones arides, la rosée peut avoir une importance majeure, équivalente ou supérieure à l'apport d'eau de la pluie. C'est même la seule source en eau que les plantes peuvent boire dans des zones insulaires comme les îles Galapagos, au large de l'Équateur.

15 Quelle est la température de l'eau souterraine ?

L'eau souterraine se déplaçant lentement, elle a généralement la même température que la roche aquifère qu'elle occupe et qui varie avec la profondeur.

- L'eau de la première nappe souterraine dite « phréatique » (voir question 31), se situant à une profondeur de quelques mètres ou dizaines de mètres, a généralement une température proche de celle du sol mais variable suivant les saisons, comme celle des eaux de pluie infiltrées.

- Vers 30 à 40 mètres de profondeur, le terrain et l'eau souterrains ont une température constante voisine de la température moyenne annuelle de l'air en surface, par exemple 12 à 15 °C en région tempérée, près du niveau de la mer.

- Plus bas sous terre, la température de l'eau augmente, comme celle du sous-sol, de 3,3 °C tous les 100 mètres en moyenne, à l'exception des régions arctiques où le sous-sol peut être gelé jusqu'à plusieurs centaines de mètres de profondeur (il ne contient alors que de la glace) ou, à l'inverse, en région volcanique où la température augmente plus vite avec la profondeur et où les eaux souterraines sont généralement chaudes. En pays tempéré, la température du sous-sol peut dépasser 100 °C au-dessus de 3 000 mètres de profondeur.

Des accidents particuliers du sous-sol, comme les failles, peuvent favoriser la circulation plus rapide d'eau souterraine. Par exemple, la remontée d'eau profonde à température élevée (dite « thermale » dès que sa température excède d'au moins 5 °C celle des eaux ordinaires locales), souvent à l'origine de sources chaudes à très chaudes, proches de l'ébullition, comme à Dax, s'accompagne de vapeur et produit des geysers (voir question 17).

Généralement, les eaux souterraines sont chaudes car en majeure partie situées à d'assez grandes profondeurs.

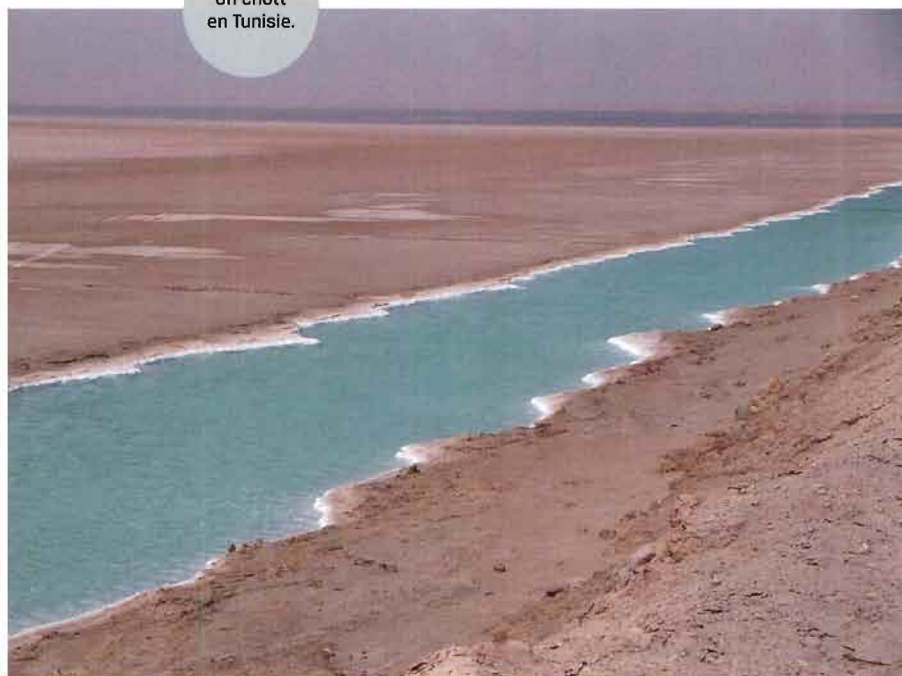
16 L'eau souterraine peut-elle s'évaporer ?

Dans des réservoirs souterrains comportant des poches d'air, comme les cavernes des massifs calcaires creusées par l'eau, l'humidité de l'air est saturée. L'évaporation, seulement entretenue par des courants d'air, y est limitée.

Pour des nappes d'eau piégées dans le sous-sol, le phénomène d'évaporation ne se produit pas dans les régions sous climat tempéré ou tropical humide, mais il n'est pas négligeable en climat plus sec et chaud, pour des sites humides déprimés, là où la surface de la nappe phréatique est très proche du sol. Dans ces cas, en saison chaude, les remontées capillaires font évaporer l'eau directement depuis la nappe à travers le sous-sol et le sol, peu épais à traverser.

Dans les régions sous climat aride, où le pouvoir évaporateur de l'atmosphère est plus intense, l'évaporation peut aussi être la cause principale d'émission de nappes souterraines, y compris celles d'origine profonde. C'est le cas tout particulièrement dans les bas-fonds ou dépressions sans aucun

Un chott
en Tunisie.



exutoire, comme les chotts ou sebkhas des régions présahariennes, ou les salars des pays andins. Dans ces dépressions, des lacs temporaires se forment et disparaissent par le double phénomène de l'infiltration et de l'évaporation.

À la périphérie des oasis, les nappes souterraines, alimentées surtout par les irrigations, sont peu profondes et s'évaporent en se concentrant en sels. Par exemple, au sud de l'oasis du Tafilalet (Maroc présaharien), la salinité de l'eau souterraine atteint le double de celle de l'eau de mer.

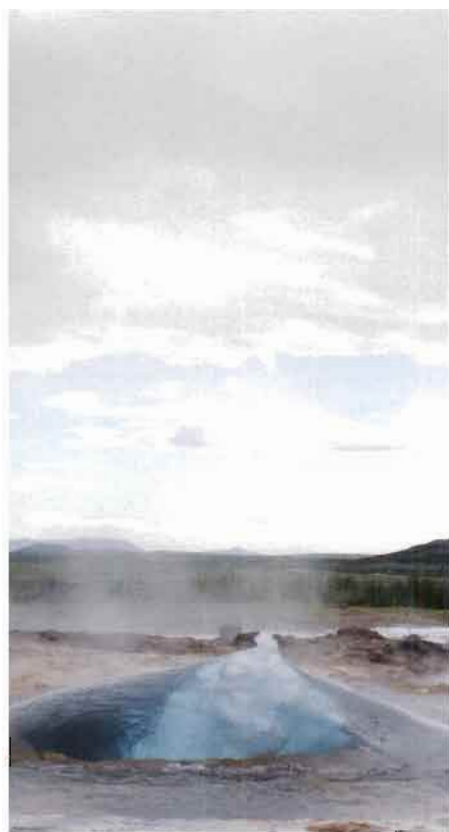
À une échelle plus globale, dans les bassins versants dits « endoréiques » (c'est-à-dire sans débouché sur les océans), qui s'étendent sur un cinquième des terres émergées (soit 30 millions de km²), tout l'écoulement superficiel (environ 1000 km³ par an) finit par s'évaporer. Les quelques centaines de km³ annuels d'écoulement souterrain sont eux aussi voués à l'évaporation par les marges affleurantes.

17 D'où vient l'eau des geysers et des sources chaudes ?

L'eau des aquifères profonds est naturellement chaude (voir question 15), comme les roches dans lesquelles elle circule. Par exemple, sa température dépasse généralement 40 °C à 1000 m de profondeur dans le sous-sol des pays sous climat tempéré.

À l'origine des sources chaudes il y a des accidents géologiques, comme les failles, facilitant la remontée d'eau assez rapide pour n'avoir pas le temps de se refroidir. Ces sources sont d'autant plus fréquentes en région volcanique, où la température en profondeur est plus élevée. Par ailleurs, on sait que la température d'ébullition de l'eau varie avec la pression ambiante : elle diminue en altitude (l'eau bout à 85 °C au sommet du mont Blanc) ; à l'inverse, en profondeur, l'eau souterraine reste à l'état liquide bien au-dessus de la température de 100 °C, à cause de la pression.

Cependant, en domaine volcanique encore, où la température s'élève plus vite que la pression en profondeur, l'eau souterraine peut se vaporiser localement, ce qui déclenche l'éruption jusqu'au sol d'un mélange d'eau chaude et de jets de vapeur, souvent rythmés, appelés geyser (« jaillissement » en islandais). Les geysers sont bien connus en plusieurs régions



volcaniques du monde : Islande, parc de Yellowstone (Wyoming) aux États-Unis, Nouvelle-Zélande, Kamtchatka, Japon.

Un geyser
en Islande.

18 Les volcans ont-ils besoin d'eau pour exploser ?

Les magmas qui engendrent les laves des éruptions volcaniques sont plus ou moins «hydratés». Lors de leur cristallisation, la libération d'eau, et surtout la vaporisation en surface de l'eau souterraine ou de glace contenue dans les roches encaissant les conduits volcaniques, favorisent les éruptions dites «phréatiques» (bien que cette eau vienne aussi de nappes profondes). Ces éruptions s'accompagnent de jets de vapeur, comme pour l'Etna en Sicile, dont l'activité est dite «phréatomagmatique».

Ce fut aussi le cas de l'éruption en Islande du volcan Eyjafjöll qui a perturbé le trafic aérien en 2010.

Certaines éruptions provoquent des explosions phréatiques catastrophiques, comme, en Équateur, celles du volcan Pichincha à plusieurs reprises au cours de l'année 1999.

Les éruptions de quelques volcans, comme la Soufrière en Guadeloupe, sont toutes phréatiques. Mais en 1986, une étude d'experts portant sur 5 564 éruptions recensées dans le monde a estimé que 9 % seulement étaient de type « phréatique ».

C'est dans des aquifères géothermaux peu profonds, captifs sous une couverture de roches imperméables, que la fracturation sismique ou l'augmentation du flux de chaleur provenant du magma ascendant peut déclencher des explosions phréatiques dangereuses : accompagnées de projections solides et de nuées ardentes mortelles de dioxyde de carbone, comme celle qui a détruit Pompéi en 79.

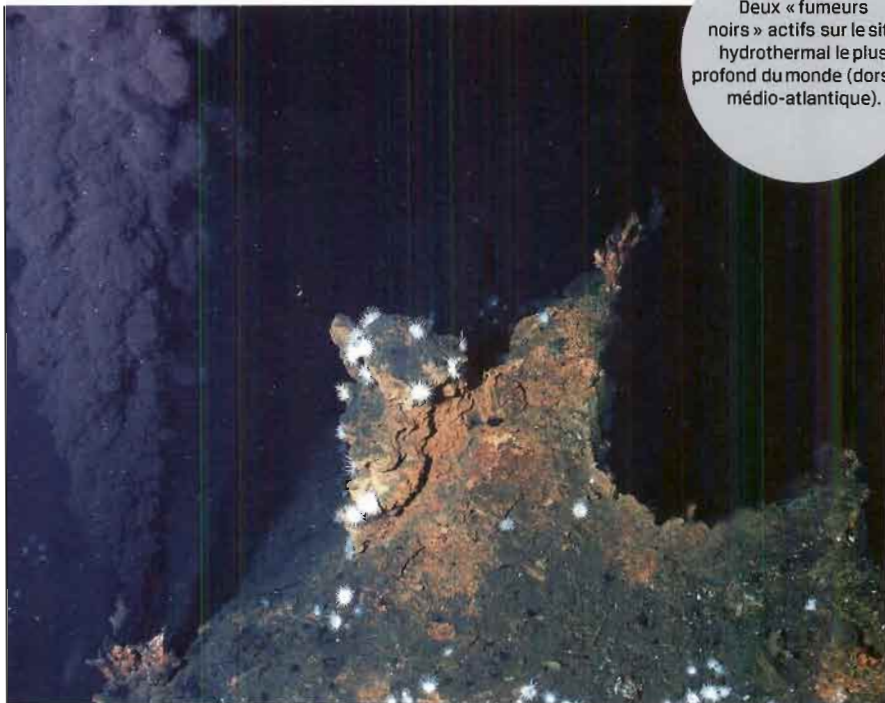


**Éruption
phréatique
du volcan Pichincha
au-dessus de Quito
(Équateur)
en 1999.**

19 La Terre a-t-elle de l'eau dans son « manteau » ?

Le manteau est la zone profonde de l'écorce terrestre comprise entre la lithosphère, dont l'épaisseur est d'une centaine de kilomètres en moyenne, et le « noyau » de la planète, à près de 3 000 km de profondeur. Il y a bien de l'eau dans le manteau. D'une part dans la composition de certains minéraux « hydratés », comme les micas ; d'autre part dans les fractures qui fissent les roches en profondeur et qui rendent possibles des échanges avec la lithosphère ou les fonds océaniques. L'eau contenue dans le manteau est en faible concentration, mais le volume du manteau est tel que la quantité d'eau contenue globalement peut être très grande (7 à 10 milliards de kilomètres cubes, selon certains chercheurs), sans doute bien supérieure au volume d'eau souterraine de la lithosphère, et bien plus que les océans qui cumulent à peine 1,4 milliard de kilomètres cubes.

Deux « fumeurs noirs » actifs sur le site hydrothermal le plus profond du monde (dorsale médio-atlantique).



L'eau qui n'est pas incorporée dans les minéraux ne peut se déplacer qu'avec une extrême lenteur. Mais sa présence facilite les mouvements profonds de l'écorce terrestre, les déplacements et la « subduction » (enfouissement) des « plaques » continentales. Cependant, c'est du manteau que proviennent les eaux des « fumeurs noirs » découvertes dans les grands fonds. Il s'agit d'eau très chaude (350 à 380 °C) et minéralisée des cheminées hydrothermales qui jalonnent les fosses des grands océans, mais ce phénomène mobilise des quantités infimes d'eau en regard du cycle de l'eau planétaire.

L'eau constitutive du manteau est bien sûr inaccessible et inutilisable !

20 Y a-t-il de l'eau sous les montagnes ?

De nombreuses montagnes sont composées de roches perméables, comme les calcaires ou les grès, qui favorisent l'accumulation d'eau infiltrée. Dans les montagnes qui ont été formées avec des roches moins perméables, l'eau s'infiltré et circule

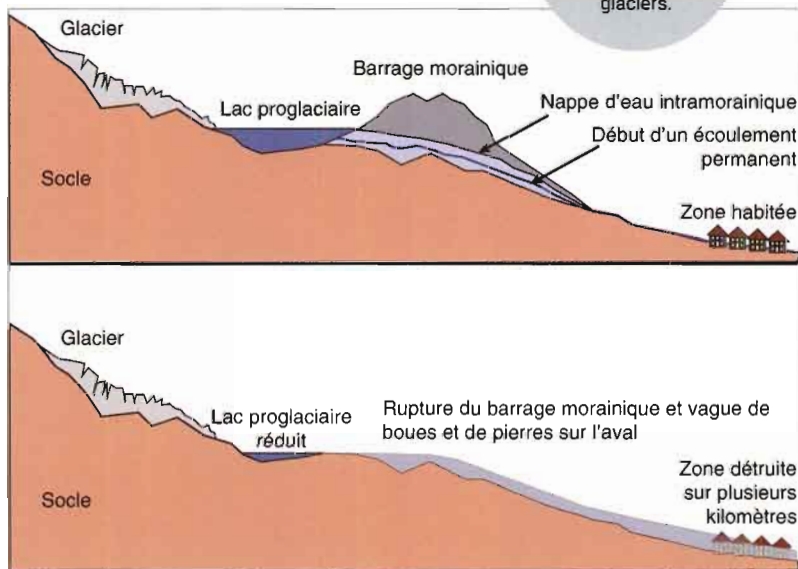
Lac proglaciaire en Haute-Maurienne, apparu depuis le retrait du glacier.



en profondeur dès lors que les roches sont plissées et fracturées. En outre, sous tous les climats, les pluies sont généralement plus abondantes sur les montagnes qu'en plaine. Lorsqu'une partie des précipitations tombe sous forme de neige, les eaux souterraines bénéficient de leur fonte, plus propice à l'infiltration que les pluies. Ainsi, la vallée des Aït Bougmez dans le Haut Atlas marocain est célèbre pour ses nombreuses et abondantes sources alimentées presque exclusivement par la fonte des neiges hivernales.

La plupart des grands fleuves du monde naissent de multiples sources de haute montagne : l'Amazone dans les Andes, le Gange à 4000 m dans l'Himalaya, l'Indus... et même la Loire au mont Gerbier-de-Jonc, le Rhône dans les Alpes suisses ou la Garonne dans les Pyrénées espagnoles. En témoignent les grands tunnels ferroviaires ou routiers qui traversent les montagnes en soutirant beaucoup d'eau. Ils fonctionnent comme des galeries drainantes, avec une légère pente pour évacuer l'eau. Le tunnel du Mont-Blanc, par exemple, composé de deux sections en pente vers la France et vers l'Italie, dégorge 52000 m³ par jour ; le futur tunnel transalpin projeté pour relier Lyon à Turin devrait débiter 100000 à 300000 m³ par jour.

Rupture de moraine glaciaire par le jeu des infiltrations d'eau en provenance des glaciers.



La présence d'eau souterraine en haute montagne peut s'avérer dangereuse. L'accumulation d'eau dans des nappes souterraines transitoires sous les moraines (roches transportées ou déposées par un glacier) et sous les glaciers est redoutée par les populations situées à proximité et en aval.

Plutôt en moyenne montagne en Europe mais à des altitudes très élevées en Amérique andine et dans l'Himalaya, des habitants ont créé des terrasses et ont empiriquement trouvé des dispositifs pour faire circuler l'eau en surface, de terrasse en terrasse. En plus de leur utilité pour les plantes cultivées, ces dispositifs permettent d'accroître le volume d'eau stocké dans le sol des terrasses elles-mêmes en profitant des écoulements souterrains, en grande partie alimentés par les infiltrations produites dans les terrasses supérieures.

En Cévennes, par exemple, des versants entièrement aménagés fonctionnent avec une première ligne de sources captées souvent au moyen de galeries dont l'objet est d'intercepter un écoulement souterrain. Vient ensuite une deuxième puis parfois plusieurs autres lignes de sources, alimentées cette fois directement par le drainage des terrasses supérieures.

La double
fonction
des terrasses

Terrasses
avec lignes de
sources à Saint-
André-Lachamp,
dans les Cévennes
ardéchoises
(France).



21 Y a-t-il de l'eau sous les déserts ?

Au sens de régions très arides, les déserts sont les territoires du monde les plus dépourvus d'eau : c'est là que les pluies sont le plus rares (il n'y pleut même pas tous les ans) et les plus faibles (quelques millimètres par an, en moyenne). Il ne s'y trouve aucun cours d'eau permanent, à l'exception de fleuves issus de territoires voisins à climat plus humide, comme le Nil en Égypte ou l'Euphrate en Iraq, ou encore la rivière de Tarim débouchant et se perdant dans le désert du Tamataklan, au nord-ouest de la Chine.


Ainsi, dans certaines parties seulement des déserts, deux sortes d'eau souterraine peuvent exister : des eaux dites « héritées » ou dites « importées ».

Le sous-sol de certaines régions désertiques peut comprendre des couches de terrain sédimentaire perméable (sables, grès, calcaire) plus ou moins profondes mais en partie affleurantes en périphérie. L'eau s'y est infiltrée au cours des âges – y compris en des temps moins arides – et y a été conservée depuis plusieurs milliers ou dizaines de milliers d'années, même si les apports présents sont infimes et épisodiques (une fois tous les dix ou vingt ans, par exemple). On les qualifie d'« eaux fossiles ». À la faveur d'un accident géologique qui leur permet de sourdre, ces eaux héritées se manifestent exceptionnellement et peuvent être à l'origine d'oasis. Mais leur découverte

L'oued Gheris en crue dans l'oasis du Tafilalet (Maroc).



Depuis les temps préhistoriques, la vie nomade a longtemps été la seule possible dans les déserts. Pour satisfaire leurs besoins en eau, essentiellement l'alimentation humaine et l'abreuvement du bétail, les peuples nomades (éleveurs) et les caravaniers ont toujours transité d'un rare point d'eau à un autre – puits rustique ou maigre émergence locale d'eau souterraine d'un aquifère profond ou dunaire. Ces ressources, bien que souvent saumâtres, pouvaient être matière à conflits.



Nomades
dans le désert

moderne provient de forages profonds effectués lors des prospections d'hydrocarbure. Leur exploitation, favorisée souvent par l'artésianisme (voir question 66), est possible, mais ne peut être durable. Elle s'est développée au xx^e siècle, dans plusieurs déserts : au Sahara et en Nubie, en Australie (dans le Great Artesian Basin), en Arabie Saoudite.

L'exemple le plus achevé de cette course aux eaux profondes se trouve en Libye. Sous le régime de Khadafi, le pays s'est doté d'un dispositif d'extraction de l'eau pour créer de véritables « fleuves artificiels » (slogan national), en réalité des tuyaux de gros diamètre à demi enterrés. L'idée de ce dispositif était de fournir une source d'approvisionnement pour les villes du littoral, essentiellement Tripoli et Benghazi, et de développer des zones irriguées dans le désert.

La situation est très différente dans les régions arides, qui bénéficient d'écoulements souterrains provenant de chaînes de montagnes périphériques, comme le nord du Sahara ou le sud des déserts d'Asie centrale. Là, des cours d'eau irréguliers alimentent périodiquement par leurs crues des nappes souterraines localisées, accessibles et exploitables par puits ou galeries drainantes, sources évidemment plus pérennes pour les oasis.

22 Y a-t-il des sources d'eau douce sous la mer ?

Des sources sous-marines, au fond de la mer, existent au large de régions littorales aquifères. Elles sont toujours assez proches de la côte et peu profondes, car la plus forte densité de l'eau de mer compense la pression possible de l'eau douce au-delà d'une centaine de mètres. En fait, l'eau de ces sources

n'est généralement pas tout à fait douce, mais un peu saumâtre, car déjà quelque peu mélangée à l'eau de mer.

L'origine de ces sources est due surtout aux changements de niveaux de la mer au cours des temps préhistoriques : en Méditerranée par exemple, le niveau de la mer s'était abaissé de plus de 100 m pendant les périodes glaciaires, il y a vingt mille ans, et même beaucoup plus à une époque plus reculée – antérieure à l'humanité – dénommée Messinien.

La remontée du niveau de la mer a noyé les sources qui s'étaient formées à la base des massifs calcaires aquifères, et celles-ci ont continué à couler plus ou moins. Plusieurs dizaines de sources sous-marines côtières ont été recensées en Méditerranée, surtout près de la rive nord, et leur débit total a été chiffré entre 1000 et 2000 m³ par seconde selon les expertises. Des sources sous-marines sont connues aussi près d'autres littoraux, notamment en Floride et au Mexique.

23 L'eau coule-t-elle toujours de haut en bas ?

Dans les rivières ou les canaux, à l'air libre, en ruisselant sur des pentes rocheuses ou en s'infiltrant dans le sol, sous la même pression atmosphérique, l'eau coule toujours en descendant la pente, « de haut en bas ».

Par contre, dans des conduites sous pression ou des chenaux souterrains naturels saturés, le « haut » et le « bas » ont le sens de haute pression et de basse pression : c'est la différence de pression qui fait couler l'eau. Dans certains circuits, ce peut être de bas en haut, comme dans les « colonnes montantes » des canalisations de desserte des immeubles, dans les jallissements de jets d'eau, dans les puits artésiens ou dans les conduits ascendants des sources vauclusiennes. Il y a longtemps que les Grecs puis les Romains, en inventant les siphons inverses pour franchir des vallées sans aqueduc en viaduc, avaient su faire remonter l'eau sans pompage. Par exemple, l'eau parvenait au cœur de la ville romaine d'Argentorun après 25 km de parcours souterrain et remplissait les réservoirs grâce à la pression de l'eau.

En somme : ne pas confondre altitude et pression !



Dégagement de la conduite d'eau romaine de Kuttolsheim à Strasbourg, au début du XX^e siècle.

24 L'eau souterraine peut-elle gêner les activités humaines ?

L'eau souterraine fait obstacle à toute occupation du sous-sol, notamment dans les villes, où les aménagements et la maintenance des voies de circulation souterraines, les parkings souterrains, l'«urbanisme souterrain» en général, nécessitent un dénoyage. Par exemple, à Paris, le pompage d'épuisement du métropolitain doit débiter plus de 10 millions de mètres cubes d'eau chaque année.

Dans les années 1960-1970, la construction du métro à Lyon a fait l'objet d'expérimentations préalables très longues pour assurer l'étanchéité des tunnels qui allaient être établis sous le niveau de la nappe phréatique. La première ligne n'est inaugurée qu'en 1978. Au Caire, dans les années 1990, la réalisation de la première ligne de métro africain bute également sur la difficulté liée au tracé du tunnel principal dans l'ancien lit du Nil, là où la nappe est parfois affleurante.

L'eau souterraine gêne l'exploitation des mines, où l'exhaure dans les galeries peut atteindre des volumes bien supérieurs à ceux du charbon ou du minerai. Par exemple, du temps où les houillères étaient exploitées en France, on devait extraire en moyenne trois fois plus d'eau que de charbon, même vingt fois plus dans certaines mines.

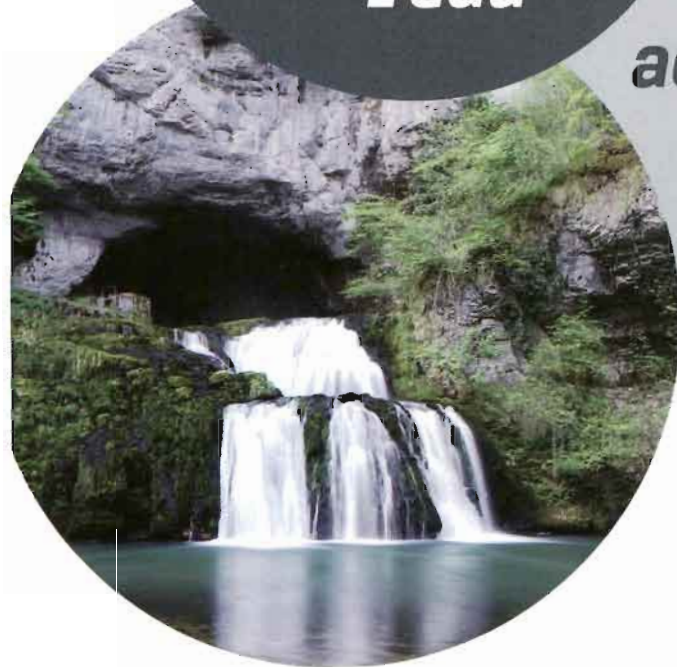
L'eau souterraine peut aussi entraver l'agriculture dans certaines basses plaines où la nappe phréatique (voir question 31) trop proche de la surface réduit la fertilité du sol et peut entraîner sa salinification, ce qui nécessite un drainage. C'est encore plus problématique quand l'irrigation tend à suralimenter la nappe, comme dans la basse vallée de l'Indus au Pakistan.

La saturation en eau des sous-sols peut être recherchée lorsque la ville a été construite sur des zones humides, avec pour « fondations » des bâtiments de très nombreux pilotis en bois fichés dans un substrat imbibé d'eau. L'assèchement du sous-sol provoquerait un pourrissement des pilotis et un risque d'effondrement de la construction. En Hollande, certains quartiers disposent d'un canal dont l'eau sert principalement à recharger la nappe d'eau souterraine en milieu urbain, afin d'avoir une humidité stable dans la zone des fondations.

Le drainage des eaux souterraines dans ce type de ville lacustre peut avoir des conséquences catastrophiques. On cite souvent le cas de la ville de Mexico, qui avait été bâtie sur un lac. Après la conquête espagnole, les nouvelles autorités décidèrent de drainer le lac et l'aquifère associé. Cinq siècles après, le centre-ville de Mexico s'est affaissé d'une dizaine de mètres, produisant un chaos dans la structure des immeubles. D'un autre côté, un sous-sol urbain très humide peut avoir aussi des inconvénients en cas de tremblement de terre. Lorsque les ondes sismiques passent par des zones sédimentaires humides sur lesquelles sont bâties des villes, les oscillations du sol s'amplifient, et l'impact du séisme s'accroît.

L'eau

active



25 Comment l'eau circule-t-elle dans le sol ?

L'eau circule dans différents compartiments du système océan-atmosphère-continents : c'est le grand cycle de l'eau. L'eau contenue dans le sol vient essentiellement des pluies mais est aussi liée à des transferts d'écoulements de zones plus ou moins lointaines, de débordements de cours d'eau parfois influencés par l'homme et d'apports artificiels (détournement des eaux pour l'arrosage des champs). Cependant, ce qui se passe à l'interface entre l'atmosphère et le sol dépend largement de l'état de la première couche de terre rencontrée par l'eau de pluie.

La formation d'un sol résulte des interactions entre le substrat géologique et l'ensemble des éléments vivants qui évoluent en fonction du climat et de particularismes géomorphologiques locaux. Ce phénomène est appelé pédogenèse. En dehors de zones particulières où il n'y a pas de pédogenèse (sols entièrement minéraux), les couches du sol (les « horizons ») ont une épaisseur comprise entre quelques centimètres et quelques mètres. À l'intérieur de ces horizons, l'eau joue un rôle important.

L'eau se lie en partie aux éléments constitutifs du sol, les minéraux et les composés organiques. Une part est totalement fixée dans la composition minérale; une autre est très fortement adsorbée et ne peut se libérer; une troisième part est liée par capillarité aux composants du sol, notamment à ce que l'on appelle le complexe argilo-humique, lui-même produit par la dégradation de la roche mère et par celle de la matière organique; une dernière part est libre dans les vides de la structure du sol (voir question 2).

L'eau et la formation des sols

On peut donc distinguer trois réservoirs :

- une eau totalement liée aux composantes du sol,
- une eau partiellement liée qui peut être utile pour le développement des végétaux,
- une eau libre qui circule et éventuellement ne fait que passer dans le sol pour alimenter l'eau du sous-sol.

La dynamique de l'eau dans les horizons du sol est complexe, puisque la force de gravité induit un transfert de l'eau libre dans les horizons inférieurs puis dans le sous-sol, tandis que l'évaporation en surface et la transpiration des plantes provoque une remontée de l'eau vers les horizons supérieurs et *in fine* dans l'atmosphère. L'eau qui gagne les couches inférieures sous le sol est la résultante des forces en jeu.

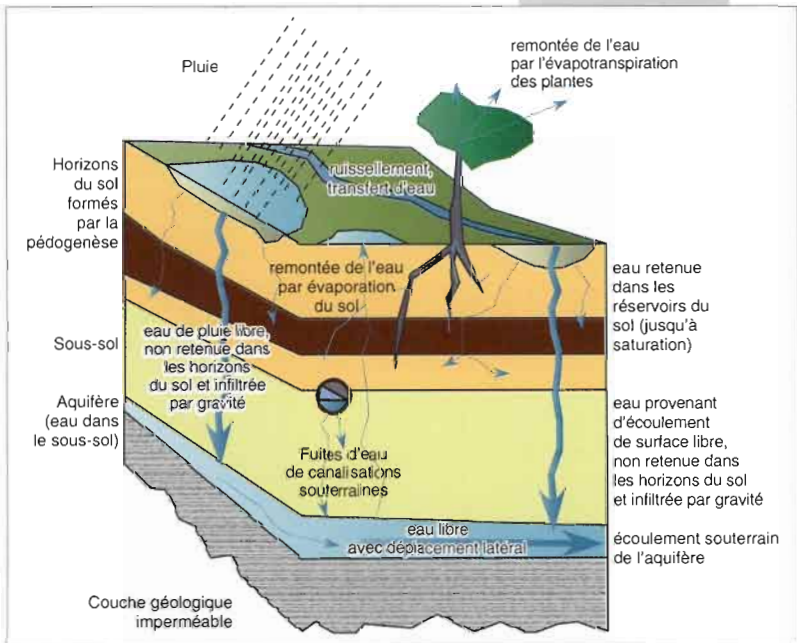
Si le sol repose sur un horizon imperméable, le transfert au sous-sol ne se produit pas verticalement. Dans les endroits où l'apport en eau est bien supérieur aux possibilités de rétention du sol, le sol sera saturé et souvent submergé, en tout cas hydromorphe et impropre au développement agricole. Un dilemme se pose alors : soit les hommes cherchent à conserver ces zones humides en tant qu'écosystèmes spécifiques, soit ils interviennent en drainant profondément les sols, brisant les couches imperméables ou évacuant les eaux par des réseaux de drains installés sous le sol cultivé, exportant donc l'eau plus bas et ailleurs.

Dans les cas où l'apport naturel d'eau est très inférieur aux capacités de rétention d'eau dans le sol, avec de longues périodes où il n'y a plus ni eau libre, ni eau retenue dans

les pores des sols et utilisable par les racines des plantes, la question du déficit de l'eau dans le sol est résolue par le jeu de transferts d'eau de zones où elle est disponible vers les zones où elle manque. De nombreuses sociétés humaines ont inventé divers artifices pour chercher de l'eau soit en profondeur, soit en surface avec des canaux ramenant de l'eau par gravité (parfois aussi par le pompage). Il ne s'agit d'ailleurs pas seulement de compensation de manque d'eau mais de renforcement même de la pédogenèse, de contribution à la création de sols dont la rétention en eau sera progressivement accrue du fait de l'alluvionnement et du développement de la vie organique dans les sols.

Toutes les eaux qui ont traversé le sol vont ensuite plus ou moins rapidement s'enfoncer par infiltration de proche en proche ou en suivant des fractures de la roche. Le circuit de l'eau se différencie avec une partie de l'eau courante qui réapparaît en surface dans les sources ou les résurgences, et une autre qui reste quelque temps dans des réservoirs libres ou dans des aquifères, ces nappes imbibant les roches au-dessus de couches

La circulation de l'eau à travers les horizons du sol.



imperméables. Ce déplacement souterrain de l'eau n'est pas seulement vertical, il est aussi latéral. Ainsi, certains aquifères situés en grande profondeur peuvent avoir été alimentés par des infiltrations et des écoulements dans les marges éloignées du site où ils se sont formés. L'eau peut donc venir de très loin et avoir voyagé plusieurs milliers d'années avant de trouver une place dans le réservoir relativement statique de la nappe. Une nappe superficielle qui se régénère plus rapidement peut aussi déborder occasionnellement dans une nappe plus profonde qui, elle, se renouvelle avec plus de temps. Quand l'homme intervient dans les liens entre les nappes en perçant certaines couches imperméables et en mettant en contact direct les nappes, cela peut être fâcheux pour l'intégrité et la pureté de l'eau, les nappes profondes généralement plus pures pouvant recevoir de l'eau contaminée. Par ailleurs, le mauvais percement d'une couche imperméable dans une zone littorale peut conduire à un phénomène inverse de contamination : une remontée d'eau saline dégrade l'eau douce plus superficielle.

26 Quand il pleut, où va l'eau ?

Avant de toucher le sol, l'eau de la pluie tombe sur la végétation (lorsqu'elle existe). Cette petite partie interceptée n'atteint pas le sol mais contribue au développement végétal. La plus grande partie de l'eau atteint le sol et la suite de son voyage dépend de l'état du sol, des aménagements anthropiques et des formes de précipitations (voir question 1).

Dans les massifs calcaires d'Afrique du Sud, l'eau de pluie pénètre le sous-sol et suit les fractures de la roche.





**Terrasses
au sud
de la province
de Ningxia (Chine),
dans le bassin
du fleuve Jaune.**

Si l'eau poursuit sa progression vers le bas du fait de la gravité. Les fractures et la porosité dans la roche lui permettent de rejoindre un premier niveau d'accumulation souterrain, que l'on appelle la nappe phréatique. Mais ce réservoir sous la terre n'est pas statique. L'apport d'eau par le haut provoque la circulation souterraine de l'eau qui, soit s'opère par déversement dans certains points naturels d'affleurement de la nappe, soit par de nouvelles infiltrations plus profondes et plus lentes qui rejoignent des nappes d'eau situées parfois à plusieurs dizaines ou centaines de mètres de profondeur.

Les hommes interviennent dans ce processus par leurs propres aménagements, limitant les infiltrations lorsqu'ils construisent des villes et des routes. Dans d'autres lieux, ils cherchent à améliorer les conditions d'infiltration. Ainsi, les labours d'automne sont favorables à la recharge de nappes d'eau car les premières pluies ne ruissellent pas. Dans les massifs montagneux, la construction systématique de terrasses sur de larges versants contribue à retenir l'eau de pluie, qui s'écoule ensuite en sous-sol plus lentement et limite l'érosion des pentes comme la force des inondations. Dans les zones arides, de petites digues filtrantes sont souvent établies pour que les eaux qui ruissellent sur des sols secs au début des précipitations soient ralenties et aient le temps d'humidifier le sol, de le saturer et d'alimenter la nappe utilisée tout au long de l'année.

27 Dans quel sol l'eau s'infiltré-t-elle le mieux ?

À l'échelle d'un paysage, pour que l'eau s'infiltré, il faut quatre couches de terrain organisées : le sol supérieur qui, par ses caractéristiques minérales, organiques et structurales, doit laisser passer une part de l'eau de pluie dans une couche inférieure, qui transmet l'eau jusqu'à une couche où celle-ci peut s'accumuler, du fait de la forte imperméabilité de la quatrième couche (voir question 1).

À l'échelle très locale d'une parcelle (où l'on focalise sur ce qu'il se passe entre le sol, l'eau, les végétaux et la faune des sols), l'infiltration est recherchée pour disposer d'une humidité favorable mais pas excessive. En fait, les sols contiennent deux parts d'eau : une part constitutive à la composition chimique et texturale, non mobilisable par les plantes, et une part libre, dont les plantes peuvent bénéficier. On distingue ainsi classiquement une réserve en eau utile, caractéristique agronomique générale, et une réserve en eau facilement utilisable, correspondant à ce que les plantes peuvent utiliser jusqu'à atteindre leur point de flétrissement (voir question 14). Les sols argileux sont plus riches, retiennent plus d'eau mais la part libre varie. Les sols sableux retiennent peu d'eau, mais celle-ci est souvent plus libre. Cependant, les sols qui contiennent de l'argile évoluent : en s'asséchant, ils créent des fentes de rétraction. Le sol acquiert de larges vides qui l'aèrent puis favorisent l'infiltration lors du retour de l'eau en surface sous forme de pluies ou d'arrosages organisés par les cultivateurs.

28 Jusqu'où l'eau peut-elle descendre ?

L'eau descend sous l'effet de la gravité en écoulement libre et par la mise en pression par des apports d'eau supérieurs dans certains systèmes. Elle peut alimenter successivement plusieurs nappes et finalement se retrouver à plusieurs centaines de mètres (par exemple, la nappe des « sables verts », sous Paris) et même plusieurs kilomètres de profondeur (nappes sahariennes, par exemple).

Mais il est également important de savoir jusqu'où l'eau peut monter ! En effet, une nappe n'est pas seulement définie par son fond imperméable qui retient l'eau à une certaine profondeur. Elle a aussi une épaisseur, qui évolue en fonction de l'accumulation des infiltrations, des débordements latéraux naturels et éventuellement des prélèvements établis sous forme de galeries drainantes ou de puits et de forages verticaux.

Le volume d'eau stocké et son accessibilité dépendent de la profondeur, de l'épaisseur et de la porosité de la couche géologique dans laquelle l'eau est retenue. Parfois, la nappe est coincée entre deux couches imperméables. L'eau accumulée au centre est mise en charge par le poids de l'eau qui descend sur les périphéries vers le centre. Si une connexion étroite existe ou est créée par l'homme, l'eau qui a atteint le point le plus bas peut être refoulée vers le haut par la pression : c'est le phénomène d'artésianisme (voir question 66).

29 Les eaux souterraines font-elles partie du cycle de l'eau ?

Les nappes souterraines proviennent principalement de l'infiltration des eaux météoriques (pluies, fonte des neiges), un peu de la condensation d'humidité atmosphérique et accessoirement d'infiltration d'eaux fluviales. Les écoulements souterrains retournent par les sources ou des drainages moins visibles aux cours d'eau, parfois directement à la mer le long des côtes, ou peuvent s'évaporer et rejoindre l'atmosphère dans des dépressions fermées en zone aride, comme les chotts du nord de l'Afrique.

La participation des eaux souterraines au cycle de l'eau planétaire peut s'apprécier à travers ces flux (voir schéma p. 52) :

- apports aux eaux souterraines : 12 000 à 13 000 km³ par an ;
- émergences d'eau souterraine qui entretiennent les écoulements de surface réguliers (elles représentent environ 30 % de toutes les eaux courantes, qu'elles soient souterraines ou de surface) : 10 000 km³ par an ;
- écoulement souterrain direct aux océans : 2 000 à 2 500 km³ par an ;
- flux d'eau souterraine évaporée : quelques centaines de km³ par an.

La vitesse de l'eau dans le sous-sol

Les eaux souterraines circulent dans les interstices des roches perméables, depuis les lieux de leur infiltration jusqu'à ceux de leur émergence, mais beaucoup plus lentement que les eaux courantes superficielles. Les vitesses de leur déplacement, observables par des expériences de traçage ou calculées d'après la perméabilité du terrain et la pente de la nappe,

varient dans une large gamme :

- de quelques mètres par an dans des terrains faiblement perméables et très profonds, à plusieurs mètres par jour dans les aquifères alluviaux de plusieurs grandes vallées fluviales, comme le Rhin ou le Rhône;
- et jusqu'à un ou plusieurs kilomètres par jour dans des terrains très fissurés et caverneux (karst) où peuvent se former de véritables rivières souterraines (voir question 35). En France, en Côte d'or, on a observé un déplacement record de 1 kilomètre à l'heure dans l'aquifère karstique se déversant par la source de Bèze en crue.

C'est parce que les eaux souterraines entretiennent les rivières que celles-ci coulent en permanence. L'alimentation des cours d'eau de surface par les précipitations est en effet fluctuante, mis à part le débit produit par la fonte des glaciers en haute montagne.

La plus grande partie des débits des rivières, et la quasi-totalité de ces écoulements de surface en période de basses eaux qu'on appelle « étiage », proviennent d'émergences d'eau souterraine, visibles par les sources ou, plus occultes, par le drainage d'aquifères.

L'alimentation des rivières

Inversement, la plus grande partie des écoulements d'eau souterraine est récoltée par les cours d'eau, dans les bassins des régions sous climat tempéré ou humide. En France, par exemple, on estime qu'environ 98 % des écoulements d'eau souterraine rejoignent les cours d'eau et que 2 % seulement, provenant d'aquifères littoraux, se jettent

directement en mer.

Comme la contribution des eaux souterraines au débit des cours d'eau représente 55 à 60 % du débit moyen annuel de ces derniers, les prélèvements d'eau souterraine impactent les écoulements de surface.

Sur l'ensemble des continents, on estime que près d'un quart de tous les écoulements fluviaux, qui totaliseraient en moyenne 42 300 milliards de mètres cubes par an, proviendrait des eaux souterraines, et que sur les quelque 12 500 milliards de mètres cubes annuels d'écoulement moyen d'eau souterraine estimé, les quatre cinquièmes rejoignent les cours d'eau.


Mais la part des eaux souterraines dans le cycle de l'eau est bien sûr diversifiée dans tous les continents, selon les conditions climatiques et géologiques.

30 Quels sont les temps de parcours de l'eau dans son cycle planétaire ?

Dans le grand cycle planétaire de l'eau, on distingue plusieurs moteurs verticaux qui mettent en circulation les grandes masses d'eau. Le premier est l'évaporation des mers et des océans (près de 500 000 km³ d'eau par an), de loin la principale origine de l'humidité atmosphérique. Il est complété par un deuxième mouvement ascendant lié à l'évapotranspiration des surfaces continentales, estimé à 65 000 km³ d'eau par an, les lacs et plans d'eau douce dans les terres évaporant environ 9 000 km³.

Au total, 575 000 km³ passent chaque année dans l'atmosphère, mais la période de transfert de l'évaporation à la précipitation est courte, de l'ordre de 10 jours. Autrement dit chaque année, 30 à 40 transferts se succèdent et provoquent finalement des précipitations dont l'essentiel retombe dans les mers et les océans (près de 460 000 km³ par an), et le reste sur les terres et les plans d'eau terrestres (environ 120 000 km³ par an).

Là, suivant le voyage et la destination de l'eau, les durées de transfert varient. En fonction des milieux et des organismes,



Dans le haut bassin andin, transition entre eau atmosphérique, début des écoulements et infiltrations.

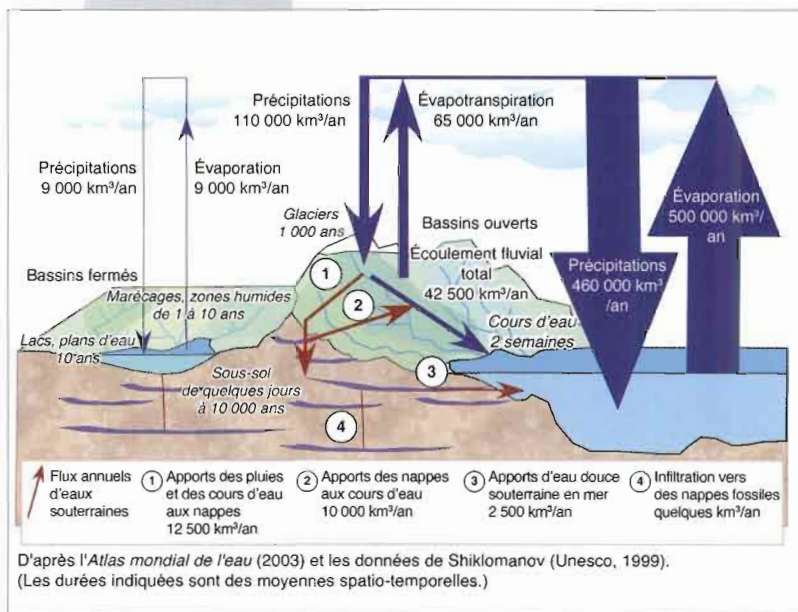
la captation de l'eau par la biosphère se fait en 1 à 4 semaines. L'écoulement superficiel est aussi relativement court, de quelques heures à quelques semaines selon l'importance du bassin collecteur et les chemins des rivières et des fleuves. L'ensemble de l'écoulement superficiel par les cours d'eau petits et grands représente un peu plus de 40 000 km³ par an, que l'on peut subdiviser en différents moments de déplacement de masses d'eau. En revanche, la dynamique de l'infiltration et de la circulation de l'eau sous le sol varie énormément. L'infiltration peut prendre une semaine à un an ou plus pour passer du sol à la première nappe (la nappe phréatique) et dix ans à dix mille ans pour atteindre des nappes profondes.

On peut noter que le déplacement des eaux souterraines est beaucoup plus lent que celui des eaux de surface.

Pour accélérer la recharge de la nappe phréatique et, par extension, des nappes plus profondes, les sociétés humaines peuvent intervenir en modifiant les états du sol pour favoriser l'infiltration, en aménageant des puits de recharge, en ralentissant les écoulements par des terrasses et des digues

filtrantes. Parfois, la nappe remonte aussi brutalement à l'occasion de périodes climatiques exceptionnellement pluvieuses.

Le grand cycle de l'eau.

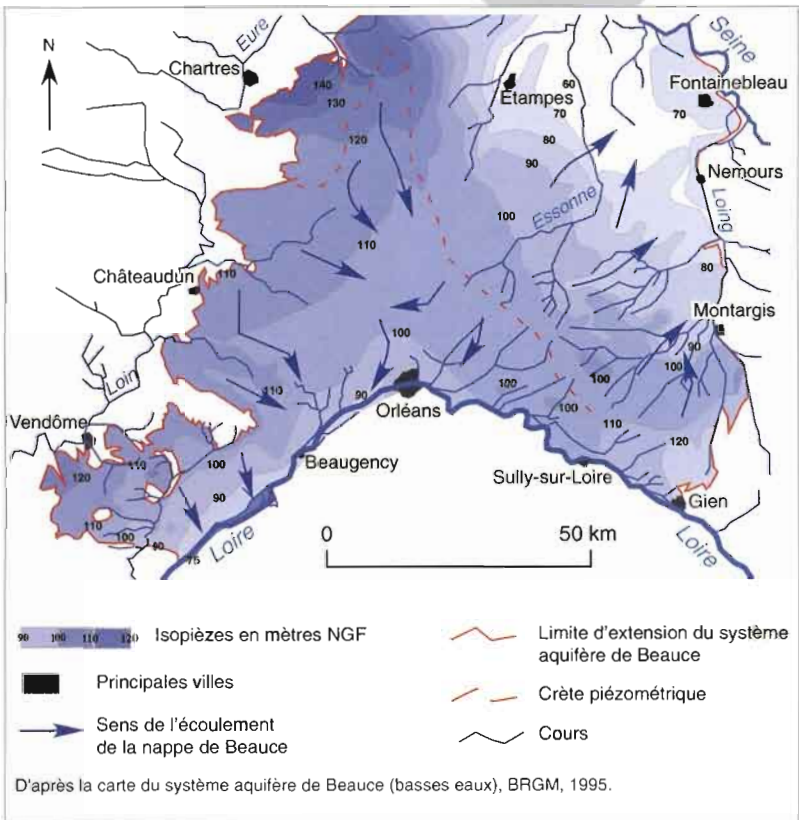


31 À quoi ressemble une nappe phréatique ?

En 1887, le géologue français A. Daubrée inventa le mot savant « phréatique » (du grec ancien *phrear*, « puits ») pour désigner la première nappe souterraine se trouvant au-dessous du sol à faible profondeur (quelques mètres à quelques dizaines de mètres) – on l'appelait auparavant la « nappe des puits » : la plus accessible.

Le mot « nappe », métaphore appropriée pour décrire un corps aplani dont l'épaisseur est faible par rapport à son étendue, convient bien à la plupart

Les niveaux piézométriques et les mouvements de la nappe de Beauce (entre les bassins de la Loire et de la Seine, France).



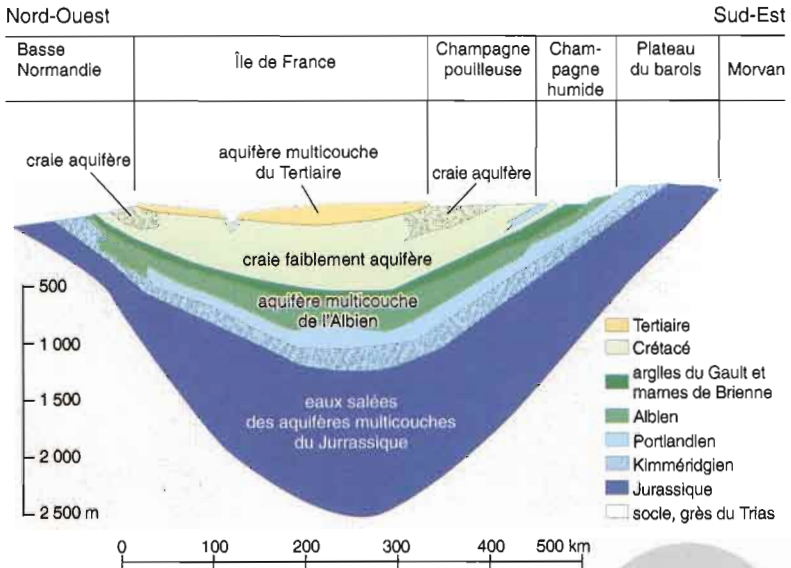
des masses d'eau souterraine, par ressemblance avec les nappes d'eau visibles en surface... Mais une nappe phréatique n'est pas un lac souterrain : c'est l'eau présente et courante dans la zone saturée d'une couche ou d'un massif de roche aquifère plus ou moins étendus, dont la surface, invisible, n'est pas horizontale et fluctue plus ou moins avec le temps. Lorsque les puits sont assez nombreux (exemple de la nappe de Beauce) et bien répartis, dans chacun d'eux, la mesure des profondeurs de l'eau et de l'altitude de son niveau permet de tracer les courbes de niveau de la surface dite « piézométrique » de la nappe, qui révèle ses pentes et le sens de son écoulement.

Les nappes phréatiques sont alimentées directement par les eaux de pluie ou de perte d'eau superficielle qui s'infiltrent, et elles aboutissent à des sources ou peuvent être drainées par des cours d'eau. Elles peuvent échanger de l'eau avec des nappes souterraines d'aquifères plus profonds à travers les couches d'un terrain faiblement perméable. Toutes les nappes d'eau souterraine ne sont donc pas « phréatiques » (voir question 32). Les nappes phréatiques se distinguent des nappes profondes, accessibles et exploitables seulement par forage, dans une gamme de profondeur de 100 à 1000 m en général.

32 Plusieurs nappes souterraines peuvent-elles se superposer ?

Le sous-sol de nombreuses régions de plaines et plateaux du monde est souvent constitué par des cuvettes sédimentaires dans lesquelles se superposent et s'étagent des couches de roche inégalement perméables et aquifères, ou quasi imperméables : sables, argiles, calcaires, grès, etc. (voir questions 1 et 2). En France, le bassin de Paris en est un bon exemple.

Dans ces bassins, différentes nappes souterraines correspondant à chaque couche aquifère peuvent se superposer : une nappe phréatique en haut et plusieurs nappes profondes sous pression, dites « captives », en dessous, parfois jusqu'à de grandes profondeurs (jusqu'à 10 km au plus dans les plus grands bassins sédimentaires du monde). Néanmoins, ces nappes peuvent se rapprocher du sol en bordure de ces bassins, et bénéficier ainsi de zones d'alimentation.



D'après le BRGM.

Coupe schématique est-ouest des grands aquifères multicouches du bassin parisien.

Des dispositions similaires peuvent exister dans le sous-sol de fosses d'effondrement tectonique ou de grands deltas fluviaux. Moralité : une nappe souterraine peut en cacher une autre.

33 Comment se renouvellent les nappes d'eau souterraines ?

Sous climat tempéré ou humide, les nappes d'eau souterraine les plus proches du sol – les nappes dites « phréatiques » – sont essentiellement alimentées par l'infiltration des eaux de pluie, ou plus localement d'eau fluviale en période de hautes eaux, ou encore de fonte des neiges en altitude... En saison pluvieuse, cette infiltration fait monter le niveau des nappes réceptrices, d'où l'appellation « recharge ».

Sous climat aride ou semi-aride, avec des précipitations à la fois beaucoup plus rares et sujettes à une forte évaporation, ce sont les crues des quelques cours d'eau irréguliers – les oueds – venus souvent de régions moins arides et montagneuses qui, en s'infiltrant, alimentent un peu les nappes souterraines de leurs vallées.

L'alimentation des nappes souterraines phréatiques est toujours un phénomène temporaire et saisonnier (voir encadré). Dans un pays tempéré comme la France, elle peut varier de 50 000 m³ à 1 million de mètres cubes annuels par kilomètre carré (soit 5 à 100 mm) en moyenne annuelle. Quant aux nappes profondes des bassins comportant plusieurs couches de roches aquifères, leur renouvellement se fait, à part un peu d'infiltration dans les aires d'affleurement périphériques dans ces bassins, par de faibles transferts d'eau depuis les nappes phréatiques supérieures, à travers des couches de

L'impact des saisons sur les nappes

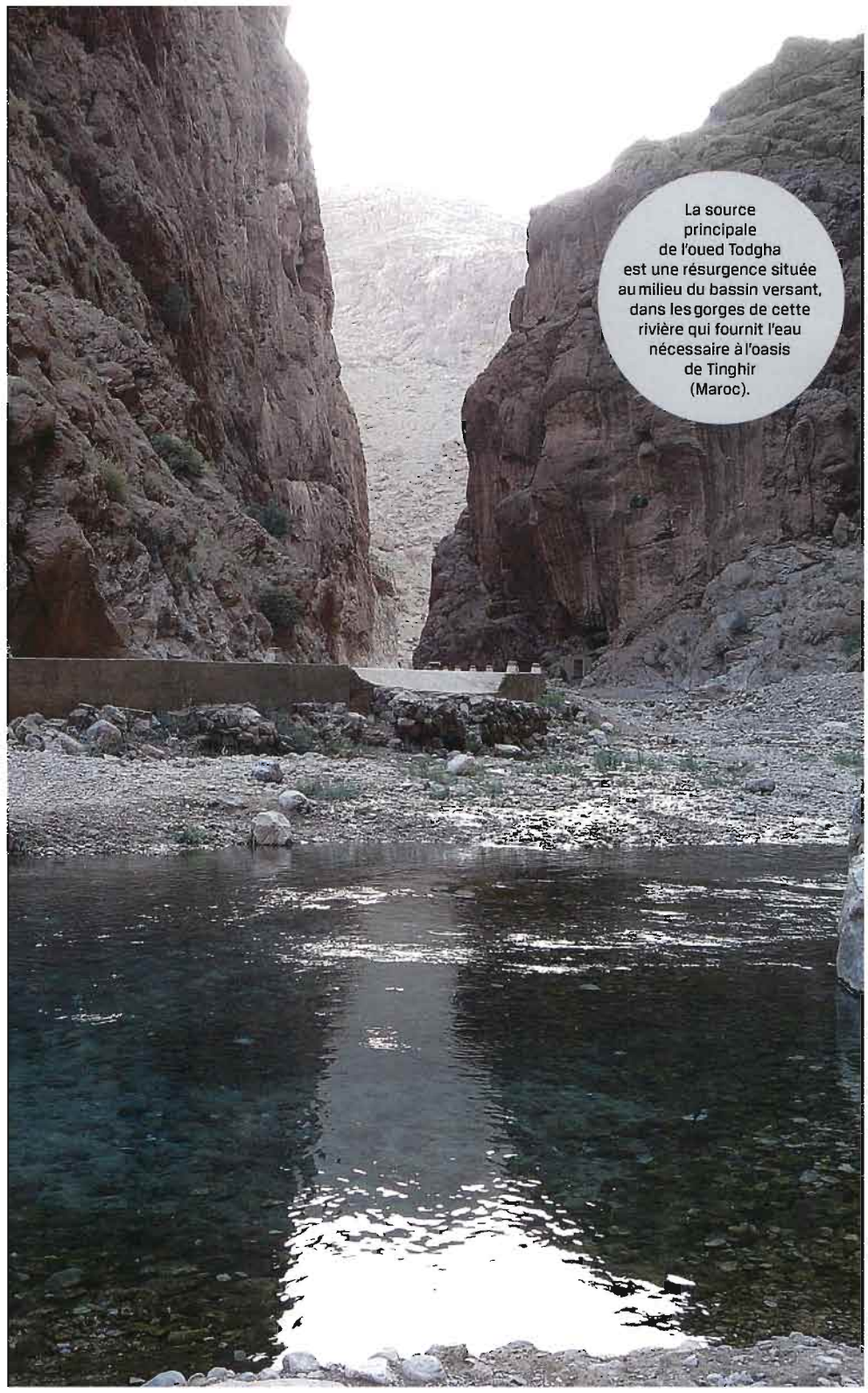
Plus la nappe d'eau est profonde et l'infiltration longue de plusieurs années pour l'atteindre et moins les variations saisonnières des pluies dans une année auront d'effet. Pour les nappes proches de la surface qui se rechargent en quelques semaines ou mois, l'impact saisonnier est évident : si des dispositifs de mesure existent, on suit les évolutions dans le temps des niveaux piézométriques pour comprendre la dynamique générale de la nappe sur un territoire et visualiser les phases de recharge naturelle en saisons des pluies, les phases de rabattement naturel ou provoqué par l'exploitation humaine de la nappe. Pour les réservoirs souterrains dans les massifs karstiques calcaires, le temps de réaction des niveaux est parfois très court, de l'ordre d'une heure à un jour. Ce sont des effets journaliers et hebdomadaires qui dominent dans le cadre des différentes saisons humides ou sèches. Dans certaines situations de plaines alluviales irriguées par des réseaux très développés de canaux gravitaires, les eaux de surface dérivées par des prises sur les cours d'eau et les pratiques d'arrosage à la raie ou par submersion contribuent à recharger la nappe en saison sèche. En effet, les pertes linéaires le long des canaux en terre et les pertes diffuses dans des milliers de champs se répercutent sur un vaste territoire agricole. Elles entretiennent un flux d'eau infiltré en profondeur, le volume de la nappe phréatique s'accroît, et les niveaux piézométriques remontent à la fin de la saison d'irrigation. Lorsque la saison d'irrigation s'arrête, les flux sortants naturels de la nappe fonctionnent avec pour seuls apports les flux entrants liés aux pluies. Si celles-ci sont de faible intensité et si le sol peut en retenir la plus grande partie, la nappe perdra plus d'eau qu'elle n'en gagnera en hiver et il faut attendre la saison d'irrigation suivante pour qu'elle se relève. En revanche, l'irrigation qui s'approvisionne uniquement avec l'exploitation des eaux souterraines, même si une part de l'eau s'infiltré à nouveau en sous-sol, ne peut jamais contribuer au relèvement d'une nappe, et au contraire, en accentue le rabaissement. De telles pratiques devraient être limitées en fonction des conditions locales de recharge de la nappe utilisée.

perméabilité minimale mais non nulle, de manière plus permanente, là où la différence de pression le permet.

En somme, tout aquifère est un réservoir qui s'alimente de temps en temps et se vide en permanence, ce qui renouvelle son stock. Plus son volume est grand, plus le renouvellement complet prend de temps. Dans beaucoup d'aquifères importants du monde, le volume de la réserve peut correspondre à des dizaines d'années de recharge.

34 Y a-t-il toujours une source à l'origine des rivières ?

Les endroits où tous les cours d'eau permanents – et eux seuls – «prennent leur source» sont des lieux d'émergence localisée ou diffuse d'eau souterraine, en amont desquels une vallée sèche ne coule qu'en temps de pluie. Un exemple typique est la rivière marocaine du Todgha, presque toujours sans eau dans son parcours montagneux dans le Haut Atlas, puis brusquement alimentée par deux grandes sources situées dans la gorge qui débouche sur le complexe oasien de Tinghir. En haute montagne, il arrive que la source soit au front d'un glacier, elle est alors l'émergence d'un torrent sous-glaciaire. Mais «la source» d'un fleuve n'est pas la seule ni la principale de son bassin versant. Dans l'ensemble d'un bassin hydrographique où les cours d'eau permanents sont plus ou moins nombreux, les sources sont multiples, dispersées, et généralement aucune à elle seule ne procure un écoulement régulier. Une rivière a des centaines ou des milliers de sources contribuant à sa dynamique (avec parfois aussi de nombreuses zones de pertes d'eau alimentant la nappe... et d'autres sources en aval). Une tradition géographique tend à privilégier la «source» d'un fleuve qui est la plus éloignée de son embouchure, même si ce n'est pas la principale de son bassin hydrographique, ce qui est souvent le cas. Par exemple, la recherche de la source du Nil donna lieu à une compétition entre géographes européens pour en déterminer le lieu exact. En Ouganda, Livingstone fut à la fois le découvreur du mince filet d'eau le plus éloigné du delta du Nil et le héros d'une expression de l'histoire coloniale devenue familière : «Dr Livingstone, I presume?» Mais cette source correspond en fait au Nil blanc, qui produit beaucoup moins d'eau que le Nil bleu venant d'Éthiopie.



La source principale de l'oued Todgha est une résurgence située au milieu du bassin versant, dans les gorges de cette rivière qui fournit l'eau nécessaire à l'oasis de Tinghir (Maroc).

35 Existe-t-il des lacs souterrains ?

En explorant le sous-sol, des spéléologues ont parfois découvert des massifs ou plateaux calcaires karstiques comportant une zone noyée en profondeur, où des barrières naturelles sur des rivières souterraines forment des plans d'eau locaux dans des cavernes (voir question 39). L'aménagement possible de leur accès en fait des sites de visite prisés pour le tourisme souterrain, comme dans le gouffre de Padirac, dans le causse de Gramat en France, où un lac souterrain dit « lac de la pluie » est navigable. Cependant, de tels lacs restent des raretés naturelles, des curiosités exceptionnelles du monde souterrain, et leurs étendues aussi bien que leurs volumes sont faibles, sans commune mesure avec les lacs de surface.

36 Y a-t-il une rivière sous la rivière ?

Les lacs et les cours d'eau sont des nappes d'eau à l'air libre formées à partir d'un fond imperméable. Ils cachent fréquemment plusieurs nappes d'eau souterraines étagées, dépendant ou non les unes des autres, soit parce que, sous le fond, il y a de l'eau piégée bloquée entre deux couches imperméables qui provient d'infiltrations périphériques, soit parce que le premier fond n'est pas si imperméable que cela et laisse passer une part d'eau de la zone humide dans les profondeurs du sous-sol.

En effet, les alluvions qui tapissent le lit de la plupart des vallées fluviales contiennent de l'eau qui forme un « sous-écoulement » variable, beaucoup plus lent et moins abondant que le cours d'eau de surface mais en échange fréquent avec ce dernier. On appelle parfois cet écoulement « inféroflux ». Mais il ne s'agit pas d'une « rivière souterraine », qui n'existe qu'exceptionnellement dans les terrains calcaires caverneux (voir question 39).

Les sous-écoulements sont particulièrement précieux et utiles en zone aride, où ils offrent souvent la seule ressource en eau permanente et régulière dans des vallées où les écoulements de surface sont très irréguliers et temporaires. Au Maroc, par exemple, chaque point où l'écoulement souterrain ressort dans le lit souvent sec d'une rivière est sujet à une appropriation sociale, une dérivation vers un village ou un hameau pour

un usage permanent très codifié localement. La même dérivation peut aussi fonctionner avec les écoulements superficiels quand ils se produisent, mais l'espace de leurs utilisations et les règles d'accès peuvent être différentes de celles qui régissent l'usage de l'eau qui circulait sous la rivière.

37 L'eau souterraine peut-elle provoquer une inondation ?

Le débordement direct d'une nappe d'eau souterraine est rare. Il peut se produire lorsque la nappe est très proche du sol, dans les creux de coteaux ou même de plateau, et qu'elle est fortement et brutalement rechargée par l'infiltration d'une pluie exceptionnelle. Elle peut alors exceptionnellement jaillir et inonder les lieux. Ainsi, en France, le débordement de la nappe souterraine dite de la craie est survenu dans le bassin de la Somme au printemps 2001.

Cependant, dans les bassins fluviaux riches en nappes souterraines, la surcharge de celles-ci amplifie leur apport aux rivières qui les drainent. Par le relèvement de leurs niveaux et l'accroissement de leur volume, elles prolongent les débordements de ces cours d'eau en crue.

Dans la vallée et le delta du Nil, jusqu'aux années 2000, certains propriétaires abandonnent l'agriculture et vendent le sol, et même une partie du sous-sol argileux, à des entrepreneurs qui l'utilisent pour fabriquer des briques.



Dans un contexte artificiel urbain, l'inondation d'un quartier se produit parfois par voie souterraine, lorsque le réseau d'égouts est saturé ou défaillant. Ce désagrément est récurrent au Caire, dont l'assainissement urbain suit difficilement l'expansion de la ville depuis le début du xx^e siècle. Cela prit des allures catastrophiques au milieu des années 1960 et au début des années 1990, quand toute une partie de la ville se trouva pendant plusieurs semaines avec de l'eau permanente dans les rues. Le réseau souterrain de drainage des eaux usées était très sous-dimensionné par rapport aux besoins. De fortes pluies avaient contribué à en détruire une partie, ce qui avait empêché l'évacuation de toutes les eaux de la ville pendant ces semaines. Le problème subsistait toujours en 2013, avec des interventions de l'armée pour effectuer des travaux d'urgence. Toujours en Égypte, dans les campagnes irriguées, on observe depuis plus de trente ans d'autres phénomènes causés à la fois par la dynamique de nappe phréatique assez proche du sol et par l'impact indirect de l'urbanisation. D'une part, l'arrosage s'est intensifié, mais de nombreuses zones pâtissent des défauts du réseau de drainage à ciel ouvert, encombré, mal entretenu. D'autre part, dans le centre et le nord du delta, les paysans ont opté pour la culture du riz, bien plus rentable et adaptée à leur situation que celle du coton qu'on leur avait imposé autrefois : cela contribue à la remontée de la nappe. Dans le même temps, certaines familles paysannes

Sur de nombreux sites en Égypte, le surcreusement des parcelles entraîne la submersion du terrain par la nappe phréatique, qui est généralement saumâtre.



ont vendu le sol et le sous-sol proche de ces cultures pour fabriquer – illicitement – de briques de terre (voir aussi photo p. 111). L'eau s'est alors mise à envahir ces terrains surbaissés de un ou deux mètres (inondation anthropique).

38 Trop d'eau dans le sous-sol crée-t-il une zone humide ?

Toute nappe constituée à l'intérieur des terres à une altitude donnée va fonctionner avec des apports mais aussi avec un ou plusieurs exutoires conduisant l'eau à une altitude plus basse. Ainsi, l'eau de nappe perchée circule dans le sol verticalement mais aussi latéralement et peut, sur les bords de la nappe, s'approcher de la surface du sol et entretenir une zone humide qui alimente des cours d'eau de surface. Dans les zones arides et semi-arides où les températures sont élevées, il arrive qu'à l'approche du sol la nappe remonte plus vite en surface par capillarité et contribue à la formation de zones humides mais salées. En remontant et s'évaporant, les sels dissous dans l'eau finissent par s'accumuler dans l'horizon supérieur du sol et cela induit une écologie particulière.

Dans toutes les situations où les apports d'eau, naturels ou provoqués par les sociétés humaines, s'avèrent excédentaires, l'accumulation d'eau dans tout le sous-sol et même le sol peut conduire à deux formes d'adaptation. On peut décider de sanctuariser les zones humides alimentées par ces excès, au point parfois de les classer comme des espaces naturels protégés. L'exemple typique est celui de la Camargue, dont le parc naturel reçoit les eaux en provenance des rizières situées juste en amont dans le delta du Rhône. On peut aussi mettre en place un dispositif de drainage superficiel pour évacuer les eaux de surface superflues, et le compléter par des systèmes de drains souterrains pour éviter que les sols destinés à l'agriculture soient constamment engorgés.

La très grande majorité des régions irriguées du monde situées dans les plaines alluviales et les deltas ont été équipées de vastes réseaux de drainage, souvent en retard par rapport à la mise en place des réseaux de canaux d'irrigation. L'investissement pour l'assainissement des terres gorgées d'eau intervient plutôt lorsque l'environnement se dégrade après une période d'arrosages plus ou moins intensifs.

39 Quelle est l'origine des rivières souterraines ?

C'est dans les terrains calcaires caverneux où la circulation d'eau souterraine en profondeur engendre un réseau de chenaux dits « karstiques » que certains de ces chenaux, en partie dénoyés, forment de véritables cours d'eau souterrains, parfois navigables sur des kilomètres, ou entrecoupés de cascades ou de tunnels noyés.

Parfois, une rivière souterraine provient d'un cours d'eau de surface qui s'est engouffré dans un puits naturel en arrivant en terrain karstique. Généralement, elle revient au jour par une source débouchant d'une grotte, comme, en France, celles de Padirac, de Labouiche (près de Foix) provenant de la perte de l'Aigue Perdent, navigable sur plus de 3 km, ou celle, visitable, de Bramabiau, formée par la perte du ruisseau du Bonheur en bordure des Causses, à l'ouest de l'Aigoual.

40 L'eau souterraine a-t-elle un pouvoir érosif ?

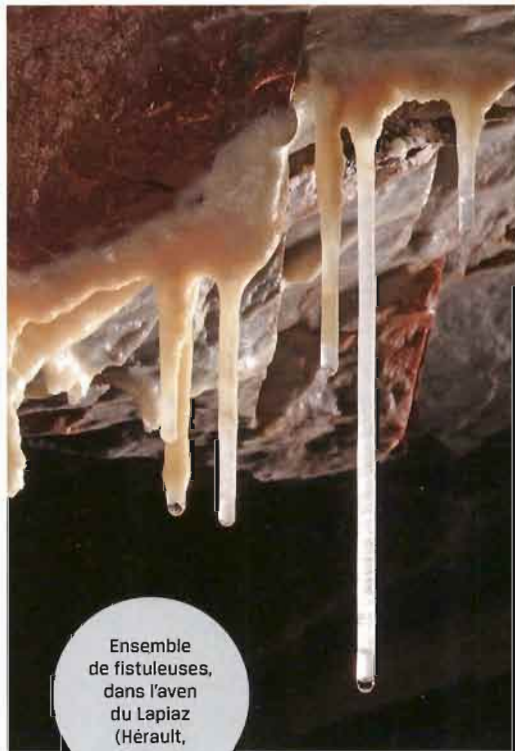
Dans les roches aquifères poreuses ou fissurées et très peu solubles, comme les sables et graviers, les grès ou les roches cristallines (granite, lave...), les eaux souterraines n'ont aucun pouvoir érosif chimique ou mécanique significatif; de même dans les roches solubles, sel gemme ou gypse, qui sont quasi imperméables, sauf à leurs limites. Par contre, dans les roches calcaires, à la fois fissurées et solubles, la circulation d'eau souterraine, rendue agressive par sa teneur en anhydride carbonique, peut à la longue agrandir les vides, créer des cavités et des cavernes, et développer ce phénomène appelé « karstification » (de Karst, région de Slovénie). La cavitation d'eau turbulente provoque aussi une usure mécanique. La quantité de calcaire enlevé chaque année par karstification dans les zones du monde les plus pluvieuses peut atteindre plusieurs centaines de mètres cubes par kilomètre carré.

De plus, les cavités creusées par les circulations d'eau dans les terrains calcaires en cours de karstification peuvent, lorsqu'elles se rapprochent de la surface du sol, déclencher l'effondrement du toit. Des gouffres aux parois subverticales se forment ainsi, dénommés avens ou abîmes dans certains plateaux calcaires du sud de la France. Celui de Padirac est le plus célèbre.

D'autres gouffres, plus nombreux, résultent de l'élargissement d'un trou où s'engouffre un cours d'eau.

41 Qui sculpte les stalactites et les draperies ?

Ces curiosités minéralogiques, qui ornent merveilleusement beaucoup de grottes, sont bien engendrées par l'eau souterraine. Celle-ci dépose du carbonate de calcium qu'elle contient en solution, lorsqu'elle s'égoutte des plafonds (créant des stalactites) ou suinte sur des parois et s'évapore (les draperies). Les gouttes qui tombent au sol à partir des stalactites forment des colonnes montantes, les stalagmites. Ces dernières finissent pas se souder aux stalactites qui leur fournissaient l'eau et le carbonate de calcium. Mais ces cristallisations naturelles variées à l'extrême ne sont pas des « sculptures » au sens d'œuvres taillées dans un bloc de matière, au contraire elles croissent avec le temps par addition de matière.



Ensemble de fistuleuses, dans l'aven du Lapiaz (Hérault, France).

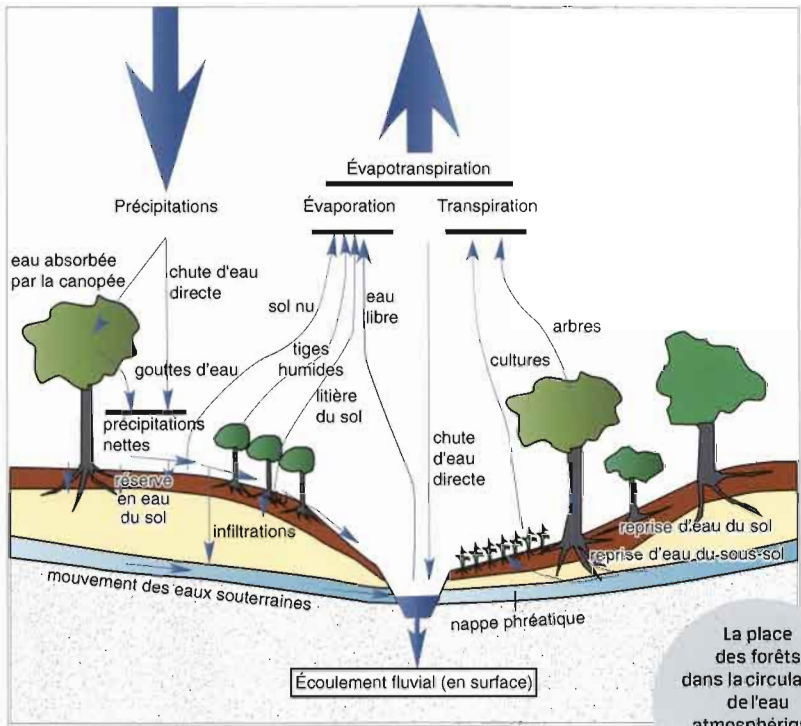
42 Les forêts sont-elles gourmandes en eau ?

On pense généralement que la forêt contribue à conserver l'eau lorsqu'elle couvre un vaste territoire. Ce n'est pas toujours vrai. Pour comprendre la complexité des effets d'un couvert forestier, il faut rapprocher tous les paramètres : milieu, climat, sol, type de forêt et aménagements.

Comme toutes les plantes, les arbres vivent en retirant de l'eau du sol par le mécanisme d'évapotranspiration. Ils sont donc consommateurs d'eau mais souvent, leur système racinaire pompe l'eau dans les horizons profonds du sol et non dans la couche supérieure, utilisée surtout par les plantes annuelles. Certaines espèces vont chercher l'eau dans le sous-sol à plusieurs mètres de profondeur, voire à 10 ou 20 mètres. Ces arbres vivent en réalité de l'eau souterraine, avec des racines puisant dans la nappe phréatique. Ce faisant, ils contribuent aussi significativement à l'infiltration des eaux de pluies, qui profitent des voies ouvertes par les racines. En outre, si le couvert végétal est dense (et que les feuilles sont toujours accrochées aux branches), la forêt intercepte les gouttes d'eau. Elles ne frappent plus directement le sol, en tout cas avec moins d'énergie donc moins d'effet érosif.

Globalement, en climat humide, la forêt joue un rôle protecteur et ralentisseur de flux, plutôt positif pour l'environnement, la rétention d'eau et sa restitution régulée naturellement (voir le schéma ci-contre). En Europe, après le vaste mouvement de déforestation qui a culminé au XIX^e siècle, les aménagements forestiers entrepris par les sociétés locales, les communes et les pouvoirs publics ont souvent rétabli un équilibre dans les massifs montagneux et à la tête des bassins versants. Mais la reforestation a parfois aussi été conçue de manière monospécifique, menée par un objectif économique à court ou moyen terme et non par des enjeux environnementaux visant à respecter la biodiversité, la circulation de l'eau ou les usages sociaux de la forêt.

En climat semi-aride, le rôle de la forêt fait l'objet de discussions et de controverses car, dans certains cas, la consommation en eau des arbres dépasse nettement leur contribution à la recharge des nappes et à la régulation des écoulements. Si, en plus, la sylviculture est conduite de manière monospécifique



La place des forêts dans la circulation de l'eau atmosphérique, superficielle et souterraine.

(forêts d'eucalyptus, par exemple), l'effet protecteur et utile pour les zones périphériques est très limité et il arrive que ces forêts finissent par assécher les cours d'eau en aval, mettant les populations riveraines dans une situation insupportable. On a vu, notamment en Afrique du Sud, des autorités publiques procéder à l'arrachage de ces forêts ou instituer une taxe pour en décourager la plantation. En définitive, certaines sociétés rurales développent empiriquement des solutions, que des agronomes cherchent à consolider. Elles consistent à créer des univers agroforestiers où les arbres jouent un rôle éminent pour la stabilité des sols, contribuent à la diversité, créent des microclimats favorables à une agriculture locale qui associe des cultures sèches et des cultures irriguées. Dans des conditions d'aridité, ces modes de gestion de l'eau ont permis la création d'oasis où sont réunies différentes strates de végétation : arborée (avec les palmiers ou les oliviers qui puisent l'eau en profondeur), arbustive intermédiaire (associée aux cultures annuelles) et saisonnière (avec des plantes qui utilisent l'eau et les nutriments de l'horizon supérieur du sol).

Si l'aménagement purement forestier conserve sa place et son intérêt dans des versants et des espaces favorables, ailleurs, dans les espaces agricoles plus classiques, là où l'arbre a eu tendance à disparaître, les nouvelles pratiques agroforestières permettront d'intégrer l'eau du sol et du sous-sol en cherchant un équilibre plus durable entre apports, prélèvements et fonctionnement de la biosphère.

43 Le sol est-il un bon filtre pour l'eau du sous-sol ?

Il ne faut pas confondre filtrage et épuration. Le filtre retient les éléments solides mais pas les éléments solubles.

Le sol est-il un bon filtre ou un bon épurateur ? Il retient les polluants faiblement mobiles liés aux composants solides et il laisse passer tous les polluants fortement mobiles lorsqu'ils sont solubles dans l'eau et que l'eau sature le sol, débutant sa descente dans le sous-sol. Les nitrates en excès sont particulièrement peu retenus et suivent donc le chemin de l'eau qui percole. Les produits phytosanitaires ont plutôt tendance à se fixer sur les éléments solides du sol, où ils seront en partie dégradés par les micro-organismes, ou transférés lors d'épisodes pluvieux par les cours d'eau superficiels. Mais une autre partie atteint la nappe et, avec le temps, s'y concentre. Bien entendu, plus l'infiltration dans les horizons du sol et dans les couches du sous-sol est lente, plus les fonctions de filtration opèrent. Au contraire, plus la porosité est forte et les fractures élevées, dans la structure des sol et sous-sol, plus le filtrage naturel est déficient.


La filtration est parfois très efficace précisément juste en dessous de certaines rivières dont le lit mineur (celui des étiages quand il y a peu de débit) et le lit majeur (celui des crues) reposent sur des alluvions très imperméables. Sous le fond de la rivière, la nappe d'accompagnement est protégée et l'eau qui s'y trouve peut être de qualité de source, comme sous le Rhône ou sous l'Hérault, peu loin de leur embouchure.

Au XIX^e siècle, la ville de Nîmes a mis en place un système d'eau potable en prélevant l'eau à 50 kilomètres de distance, dans la nappe du Rhône qui était considérée comme très favorable grâce à la filtration et à l'épuration naturelle par les alluvions du fleuve.

Les polluants les plus diffus sont d'abord les nitrates, à cause des excès d'engrais répandus en agriculture intensive sur de grandes étendues, des effluents d'élevages concentrés, mais aussi de défauts des réseaux d'assainissement. La présence des pesticides, comme l'atrazine, plus difficiles à doser, est aussi due aux pratiques agricoles. Les molécules utilisées se répandent dans le sol et le sous-sol sous les aires cultivées où l'on utilise des insecticides, herbicides et engrais chimiques.

Des sels (chlorures, sulfates) sont imputables à des rejets ou à des lessivages de déchets industriels ou miniers, comme dans la nappe d'Alsace. Ces rejets ou lessivages déposent également des traces de métaux et de composés organiques.

Les hydrocarbures, plus localisés mais nocifs à très faible dose, sont consécutifs à des accidents de transport routier ou ferroviaire, des ruptures d'oléoducs ou des fuites de stockage. Enfin, des polluants organiques, microbiens ou viraux, peuvent provenir de réseaux d'assainissement défectueux ou d'effluents de stations d'épuration.




Des polluants dans les eaux souterraines

Un polluant d'origine chimique ou biologique a une période plus ou moins longue d'action polluante, avec des formes de latence, des mobilités que l'homme peut chercher à corriger. La nature dégage aussi des éléments toxiques en quantité appréciable, comme l'arsenic au Bangladesh ou les sels dissous sur certains biefs de cours d'eau.

Depuis longtemps, on sait que certains produits nocifs pour l'homme et l'environnement sont biodégradables dans un délai raisonnable. Mais avec la diffusion des traitements chimiques agricoles, la multiplication des produits industriels et les utilisations excessives ou inappropriées dans un espace très large, les niveaux de pollutions atteignent des valeurs très élevées et rendent difficiles les processus de réversibilité.

Tout ce que l'homme produit et qui se dissout ou se transporte dans l'eau s'accumule dans certaines zones, certaines couches du sol, et finalement dans les nappes d'eau. Certains produits subsistent longtemps, comme les radionucléides, dont les périodes se comptent en milliers ou centaines de milliers d'années. D'autres molécules ne durent pas aussi longtemps, mais le problème combine la permanence des flux de pollution et les phénomènes d'accumulation. On sait aussi très bien comment les chaînes alimentaires des êtres vivants ont un effet de concentration et d'empoisonnement durable.



La persistance de la pollution

SPLENDIDE
HOTEL ROYAL
EXCELSIOR



L'eau

utile



44 Pourquoi l'eau souterraine est-elle prisée ?

Dans la mesure où les eaux souterraines sont permanentes et souvent très étendues dans le sous-sol, elles constituent les sources d'approvisionnement en eau les plus accessibles (eau de proximité exploitable directement par les usagers) et les plus constantes. Leurs réserves naturelles ne nécessitant pas d'aménagements régulateurs coûteux, elles sont aussi adaptées aux variations de demande en eau. Leurs qualités naturelles sont assez constantes, souvent acceptables pour l'alimentation en eau potable. Leurs défauts éventuels peuvent être facilement traités. Elles sont moins vulnérables aux pollutions, surtout les eaux profondes.

Bien que leur exploitation implique des coûts énergétiques, les coûts d'investissement sont moindres que pour les eaux de surface et leur rentabilité est plus rapide.

45 Depuis quand puise-t-on l'eau souterraine ?

Les nappes phréatiques, celles qui sont le plus proches de la surface (et en général alimentées directement par des infiltrations provoquées par les pluies sur le sol ou les pertes d'eau le long des rivières), font l'objet de très nombreux prélèvements. En Irak comme en Égypte et dans d'autres pays, on a retrouvé des documents prouvant l'existence de puits ou de galeries drainantes (voir question 69) il y a plus de cinq mille ans (en Mésopotamie, par exemple). Ces ouvrages ont été creusés, entretenus, renouvelés, déplacés, ajustés, agrandis tout au long de l'histoire jusqu'à nos jours.

La maîtrise de l'eau confère un certain pouvoir. Contrôler un puits ou une source aménagée permet à la fois de s'allier ceux que l'on autorise à puiser et de les rendre dépendants et redevables. En fait, il faut distinguer ceux qui autorisent l'extraction au nom du pouvoir local, régional ou central, de ceux qui utilisent et prélèvent concrètement. Ainsi, les ouvrages de prélèvement peuvent être classés comme des instruments placés soit sous emprise individuelle et privée, soit sous régime collectif relevant d'une communauté reconnue d'usagers, partageant la ressource et entretenant l'ouvrage, soit encore sous un régime plus administré relevant d'autorités politiques plus larges.

46 Peut-on cartographier les eaux souterraines ?

Des cartes hydrogéologiques issues de prospection décrivent la composition du premier sous-sol, et informent sur de nombreuses caractéristiques invisibles des eaux souterraines. Comme dans toute cartographie, on privilégie les caractères variables dans l'espace, mais stables dans le temps :

- l'étendue et la nature des terrains aquifères contenant une nappe phréatique,
- la profondeur moyenne probable du niveau de l'eau souterraine,

- la direction et sens d'écoulement des nappes souterraines,
- la position des sources issues des aquifères et leurs liaisons avec les cours d'eau,
- la possibilité de nappes souterraines plus profondes.


La consultation d'une carte hydrogéologique détaillée permet de répondre à différentes questions, telles que :

- Est-ce une nappe phréatique ou une nappe profonde sous pression ?
- Quel débit probable pourrait-on obtenir par pompage dans un puits ?
- L'eau risque-t-elle de présenter des défauts de qualité ?

Les nappes d'eau ne connaissent évidemment pas les frontières ou les délimitations politiques et administratives, qu'elles soient internationales, interprovinciales ou intervillageoises. Mais, contrairement aux eaux de surface, qui vont des terres hautes vers les terres basses, les nappes souterraines qui se trouvent dans des régions de plaine ou de plateau partagées par des frontières politiques ont des sens d'écoulement mal connus.

L'existence d'un aquifère traversé par une frontière peut donner lieu à conflit ou à coopération selon les cas, et évidemment selon l'importance des flux et des déséquilibres éventuels, notamment :

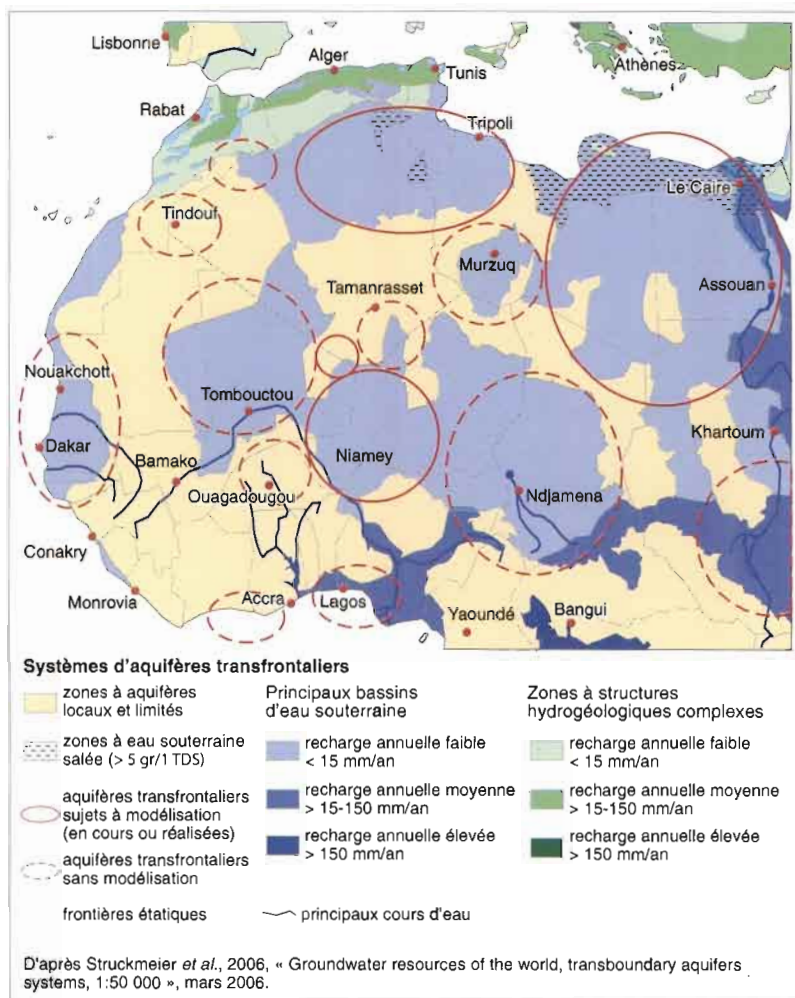
- le transit d'écoulement d'eau souterraine, qui peut évoluer au fil du temps et créer des problèmes d'accès,
- la propagation des effets de l'exploitation sur les niveaux (surtout lorsqu'il s'agit d'une nappe souterraine « captive », sous pression), qui est indépendante du sens d'écoulement,
- le transfert éventuel de pollution.



Les aquifères
transfrontaliers

Des cartes hydrogéologiques nationales de synthèse ont été établies et publiées dans beaucoup de pays, notamment en France. Une carte internationale à très petite échelle (1/25 000 000*) a même été dressée dans un but pédagogique en 1995 par l'Association internationale des hydrogéologues. Elle montre la variété des types de terrains aquifères et donne des ordres de grandeur de leurs ressources renouvelables. À l'initiative de l'Unesco, un inventaire mondial des nappes souterraines transfrontalières reconnues est en cours. En 2006, il a déjà identifié 275 aquifères transfrontaliers (programme Isarm : International Shared Aquifer Resources Management).

Ainsi, pour l'Afrique du Nord et de l'Ouest, on constate la superficie considérable des aquifères, presque tous transfrontaliers, mais aussi que les recharges annuelles sont toutes extrêmement faibles : moins de 15 millimètres d'eau par an (voir carte ci-dessous).



Les principaux aquifères transfrontaliers en Afrique du Nord et de l'Ouest.

47 Comment évalue-t-on les ressources en eau souterraine ?

Nécessairement rapportées à une nappe souterraine définie, ou à l'ensemble des nappes souterraines d'un territoire, les ressources en eau souterraine renouvelables sont évaluées en fonction du débit naturel moyen qui les alimente. Ce débit permet de déterminer une part de prélèvement durable, si les conditions techniques ou économiques sont acceptables et s'il n'y a pas de conséquences indésirables, ni pour les exploitants (en particulier sur la qualité de l'eau et le coût d'exploitation), ni pour des tiers, ni pour l'environnement. Ainsi, cette part ne doit nuire ni au débit des cours d'eau entretenus par l'écoulement souterrain ni aux écosystèmes aquatiques protégés.

Évaluer cette ressource implique donc de calculer à la fois l'alimentation naturelle des aquifères (en se basant sur les conditions hydroclimatiques et hydrogéologiques) et leur débit naturel sortant par des sources ou drainé par des cours d'eau. On complète ces calculs avec l'estimation de la régulation possible pour l'exploitation temporaire de la réserve (contexte socio-économique et écologique).

48 À qui appartiennent les eaux du sous-sol ?

En France et dans d'autres pays, les eaux souterraines n'ont pas fait l'objet d'une législation précise, à la différence des eaux de surface, rangées dans des catégories précises :

- comme des biens publics lorsqu'il s'agit de cours d'eau navigables,
- comme des biens communs sous contrôle public (même si le lit des rivières est sous le régime de propriété mitoyenne) lorsque les cours d'eau sont plus limités et non navigables. Seules les sources de faible débit et rivières intéressantes qu'une propriété d'un seul tenant, sans qu'il y ait d'autre usager de la source, ont été considérées comme des éléments d'usage privé liés au fonds.

Le statut des eaux souterraines est resté longtemps un bien d'accès plus ou moins libre, avec peu de moyens de connaître

les lieux et les actions réelles de prélèvement. En France, à la fin du XVIII^e siècle, une commission royale de médecine propose de reconnaître juridiquement des périmètres de protection des eaux souterraines qui pouvaient être déclarées « minérales ». Après la Révolution, le code civil reste évasif sur une question qui ne semble pas prioritaire en France. Jusqu'au milieu du XX^e siècle, l'accès à l'eau souterraine par des moyens artificiels était soit libre, soit un acte de fait reconnu, avec des notions de pionniers et d'antériorité. Finalement, ces extractions relevaient de « droits de fait », écrits comme des us et coutumes.

Depuis la loi sur l'eau de 1964, les eaux souterraines font partie du « domaine de la Nation » et sont soumises à différents niveaux d'autorisation de prélèvement. Comme dans d'autres pays, les législateurs ont voulu distinguer le prélèvement superficiel (entre 0 et 40 m) du prélèvement plus profond. Cette distinction reprend l'idée que la nappe phréatique est plutôt d'accès libre, et qu'il suffit de déclarer son ouvrage à l'administration. Tandis que, pour les nappes profondes, qui ne se renouvellent pas rapidement, il convient d'avoir une autorisation formelle de l'administration. Malgré l'instauration par la loi de 1992 des schémas d'aménagement et de la gestion des eaux, qui s'appliquent à différents types de territoire, notamment à ceux qui dépendent d'une nappe commune, la notion de bien commun est très peu développée, faute d'encouragement politique. Parce que l'étendue des nappes est mal connue, il est difficile d'envisager une coresponsabilité dans leur exploitation.

D'une manière plus générale, dans le monde, les États déclarent que les eaux souterraines leur appartiennent mais les préleveurs estiment disposer d'un droit d'accès inaliénable et ne se plient que fort modérément aux injonctions de contrôle, de mesure et accessoirement de paiement de taxes de prélèvement.

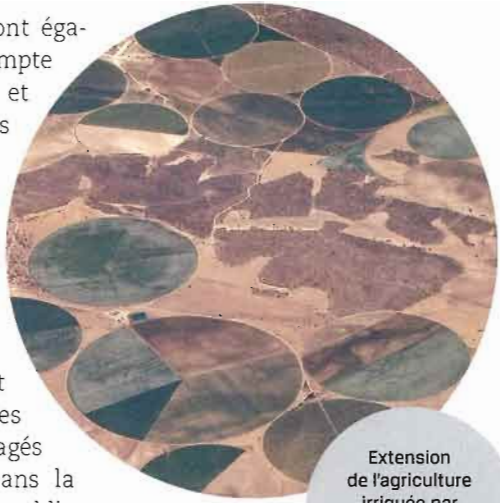
49 Quels sont les acteurs du prélèvement d'eau souterraine ?

L'eau souterraine est sollicitée pour de très nombreuses activités humaines. Les acteurs des prélèvements peuvent être classés en plusieurs catégories en fonction des usages de l'eau prélevée et selon les caractéristiques de son exploitation.

Des rapports d'échelles sont également à prendre en compte entre les niveaux locaux et les niveaux englobants (régionaux, nationaux et internationaux).

• **Les usages agricoles** ont sans doute le plus augmenté depuis quelques décennies. Dans de nombreux pays, des administrations spécialisées ont été instituées pour gérer les périmètres irrigués aménagés sous l'égide des États. Dans la panoplie de leurs actions publiques, ces offices d'aménagement ou d'irrigation ont créé des forages, qu'elles gèrent directement ou parfois qu'elles confient à des collectivités locales ou des associations d'irrigants. Il arrive aussi assez fréquemment que des collectifs d'usagers locaux de l'eau s'organisent pour établir des dispositifs d'extraction de l'eau souterraine, qu'ils administrent directement comme des biens communs et sans présence opérationnelle de l'État. Ces dispositifs peuvent être très anciens, comme des puits collectifs ou encore des mines d'eau que l'on appelle galeries drainantes (voir la question 68), mais ils ont pu être renouvelés et modernisés, et intégrer des techniques plus industrielles.

Cependant, la plupart des préleveurs d'eau souterraine pour l'agriculture agissent à titre individuel. En effet, les progrès technologiques dans le creusement de puits profonds ou de forages et l'accès à des ressources énergétiques à bas prix pour actionner des moteurs thermiques ou électriques ont incité, dans presque tous les pays du monde, les agriculteurs à se doter des matériels nécessaires. Par exemple, dans la province de Ningxia, en Chine, des milliers d'hectares sont irrigués par pompage dans la nappe phréatique car l'accès à l'eau du fleuve Jaune est limité, et la charge sédimentaire de son eau n'est pas compatible avec les dispositifs de goutteurs ou de micro-asperseurs. Parfois, le prélèvement est resté limité, à profondeur réduite et sans trop d'impact sur des nappes, qui fluctuent mais se rechargent. Mais le plus souvent, la somme



Extension de l'agriculture irriguée par multiplication de forages, au sud de l'Espagne.

de toutes les actions des préleveurs individuels conduit à plus ou moins long terme à la baisse tendancielle de la nappe exploitée, dont le devenir est incertain. Aujourd'hui, un gouffre sépare les acteurs locaux qui prélèvent à faible profondeur de ceux qui surcreusent sans cesse leur forage pour puiser de l'eau au-delà de 100 ou 200 mètres. Malgré de multiples efforts politiques pour identifier l'ensemble des préleveurs et leurs impacts, il y a un très grand déficit de connaissances des réalités locales, dans les pays en développement comme dans les pays développés.

- **Les acteurs de l'eau potable** ont le plus souvent recours à l'eau souterraine et organisent des réseaux collectifs. Comme pour l'eau à usage agricole, selon l'histoire des pays, l'eau potable peut être gérée par une organisation étatique qui chapeaute tout ce secteur d'activité (par exemple, au Maroc, l'Office national de l'eau potable), ou bien qui relève des

Dans la plaine de Bogota (Colombie), expansion des serres coupées pour l'exportation.





Complexe de serres utilisant seulement de l'eau souterraine, dans la province de Ningxia (Chine).

collectivités locales, par exemple un maire ou un président de communauté de communes. En fonction des opportunités d'accès aux ressources d'eau souterraines ou superficielles, les autorités politiques de l'eau mettent en œuvre une gestion publique directe de l'eau ou bien concèdent le service de l'eau à des entreprises privées. En France, les deux modèles coexistent pour l'exploitation à la fois des eaux souterraines et des eaux de surface (avec souvent une combinaison des deux).

- **Les industries** ont aussi besoin d'eau. Historiquement, elles ont d'abord beaucoup utilisé les eaux de surface, notamment pour disposer de sources d'énergie hydraulique. Pour développer des activités exigeantes en qualité de l'eau, des industries se reportent aussi sur les eaux souterraines, et plus particulièrement sur des nappes profondes, là où l'eau est la plus pure possible, c'est-à-dire avec un minimum d'éléments dissous et sans matière en suspension.

- **Les producteurs d'eau minérale** extraite de nappes *via* des sources ou des forages sont aussi des acteurs locaux importants puisqu'ils établissent dans leur zone de prélèvement différentes règles d'usage et suscitent des pratiques de protection des nappes. Si ce secteur est surtout structuré par des sociétés industrielles privées, il arrive que des formes coopératives ou municipales soient à l'origine de cette activité.

Un acteur fondamental du prélèvement en eau souterraine est apparu avec la prise de conscience de la fragilité de l'environnement. Aujourd'hui liées au ministère de l'Environnement, des agences de bassin ont la charge de réguler tout le secteur de l'eau, en surface comme en profondeur. Ces agences tirent la sonnette d'alarme sur la situation quantitative et qualitative des masses d'eau, en France comme dans d'autres pays du monde. Elles sont parfois appuyées ou sollicitées par des organisations non gouvernementales ou des collectifs de

citoyenneté de l'eau qui assurent des veilles locales et jouent le rôle de lanceurs d'alerte. En fait, nous sommes tous impliqués dans la dynamique des eaux souterraines par nos pratiques personnelles et collectives relatives à l'eau usée, aux produits polluants, à la gestion des déchets.

Comment l'eau souterraine est-elle gérée ?

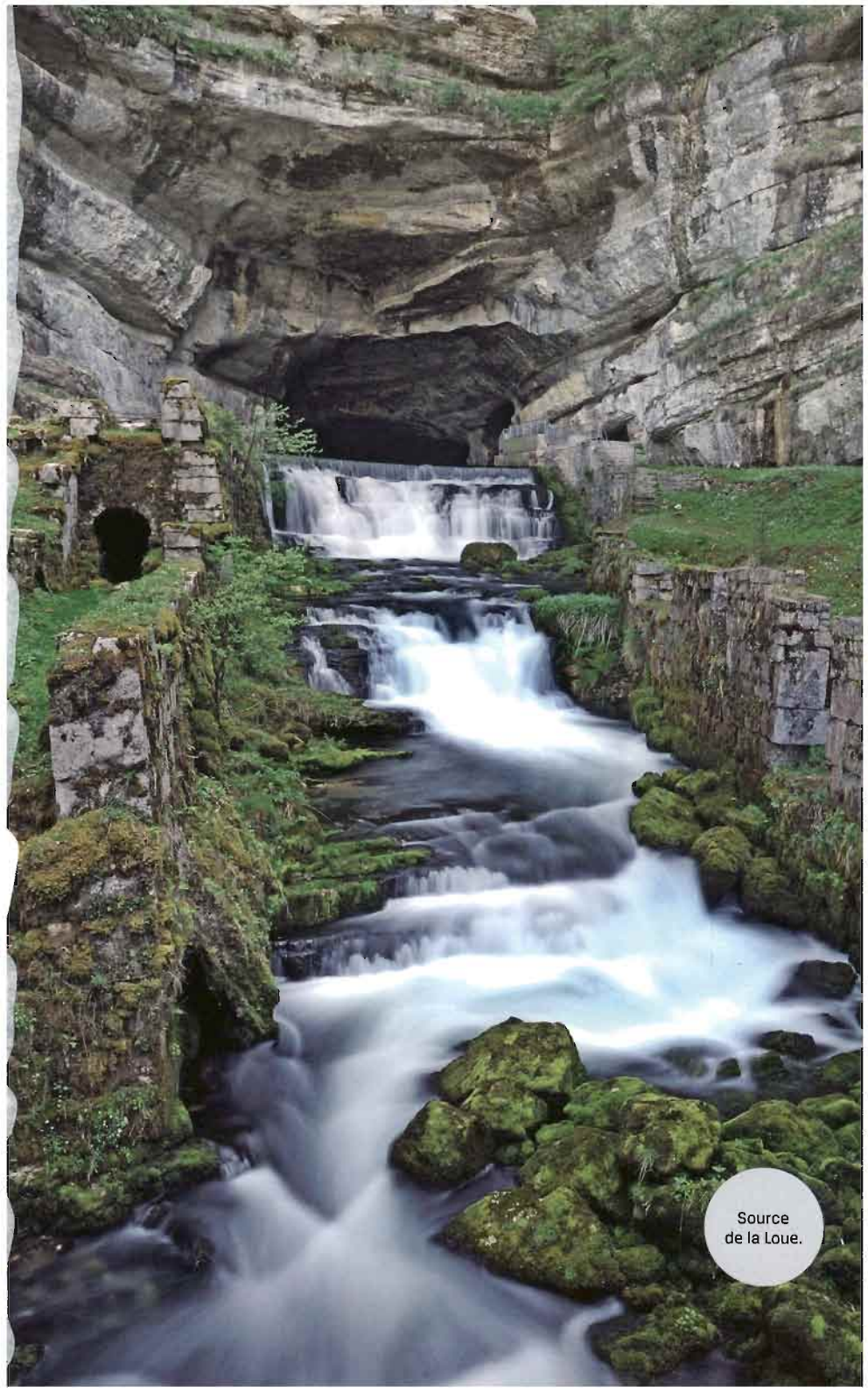
Une certaine confusion institutionnelle, légale, réglementaire et même dans l'application, règne. Les individus gèrent leur système d'extraction (voir question 71), parfois des entreprises s'en chargent, comme en Espagne. Les agences de bassin assurent avec d'autres institutions le suivi des nappes, les inventaires des auteurs de prélèvements, mais l'information est insuffisante et circule mal entre ces organisations. Les situations peuvent devenir inextricables.

Les eaux sont souvent déclarées publiques et régulées par des administrations *ad hoc*, mais les moyens de contrôle restent souvent très limités. On cherche parfois à protéger par des contrats les nappes qui servent aux usages urbains. Par exemple, les villes de Paris et de Munich rémunèrent des agriculteurs situés à proximité des sources d'eau souterraine pour qu'ils ne les exploitent pas ni ne les polluent. Dans le Roussillon, il y a des accords tacites pour que la nappe qui alimente la ville de Perpignan, non seulement ne subisse pas de dommage mais encore soit rechargée en eau par les pratiques traditionnelles d'arrosage gravitaire. Mais de manière plus globale, en ce qui concerne l'agriculture, le recours aux technologies de goutte-à-goutte incite de nombreux investisseurs à exploiter davantage les eaux souterraines car elles sont accessibles tout le temps et ne contiennent pas de charges sédimentaires.

50 D'où vient l'eau des sources ?

Une source est toujours une émergence d'eau souterraine, l'exutoire d'un aquifère phréatique ou profond où l'eau a séjourné et circulé plus ou moins longtemps en milieu poreux, fissuré ou caverneux. L'eau des sources provient donc de l'alimentation des aquifères, en général d'origine météorique :

- eau de pluie ou de fonte de neige infiltrée, pour l'essentiel ;
- condensation de l'humidité de l'air dans le sol pour une part faible (mais appréciable en altitude, ce qui explique l'existence de sources proches de sommets de montagne) ;
- parfois perte de rivière en domaine « karstique » (voir question 39) dont elle forme une résurgence : c'est le cas de la source de la Loue, dans le Jura, qui est une résurgence de pertes du Doubs, et aussi celui de la source du Loiret dans le



Source
de la Loue.

val d'Orléans, qui est une résurgence de pertes de la Loire. Quant aux sources chaudes, elles ne proviennent pas du fond de la terre : c'est de l'eau froide de surface qui s'infiltré et se réchauffe progressivement en passant par un circuit profond, et débouche finalement en surface sous l'effet de la gravité ou par la mise en pression naturelle de la nappe.

51 Comment extrait-on l'eau souterraine ?

Pour capter l'eau souterraine – au sens propre de la détourner de son cours naturel – il y a deux manières de procéder :

– soit on agit sur le niveau de la nappe en créant une émergence artificielle, dans laquelle la nappe déverse ; en fonction des légères variations de la nappe, on récolte un débit variable, qui devient nul si la nappe passe sous le seuil du déversement ;
– soit on impose un débit par puisage ou pompage, ce qui provoque une baisse plus ou moins forte du niveau pouvant conduire à de très forts rabattements de la nappe, selon la



Puisage traditionnel dans le Tafilalet (Maroc) au moyen d'un aghour. (outre relevée par traction animale ou humaine).

profondeur du pompage.

L'action sur le niveau consiste généralement à l'abaisser en creusant des tranchées ou des galeries presque horizontales (le premier jalon étant le captage d'une source dont l'abaissement peut augmenter le débit). Ou, à l'inverse, on relève le niveau de l'eau en construisant un barrage souterrain qui la fait émerger. On peut encore, lorsque la structure du sous-sol permet la formation d'une nappe

souterraine « captive » sous pression, la capter par un puits « artésien » (voir question 66), mais le débit obtenu n'est pas durable à long terme. Ces deux procédés sont sans coût énergétique.

Plus fréquente, l'extraction d'eau par puisage ou pompage, mieux adaptée à la variation des besoins, nécessite une dépense d'énergie. Le puisage par traction humaine ou animale est très ancien et de nombreux modes ont été inventés – norias, puits à balancier, entre autres – ainsi que l'usage d'énergie éolienne, mais leurs capacités demeurent modestes. Les pompes modernes équipant des puits et surtout des forages, de plus en plus profonds (jusqu'à 1000 m ou plus), sont beaucoup plus productives et peuvent relever l'eau de plusieurs centaines de mètres, moyennant un coût en énergie élevé. Ce sont les pompages qui rendent possibles des exploitations d'eau souterraine excessives et non durables.

Puits cuvelé en béton, au Maroc. Actionnée par une pompe diesel, l'eau remonte de la nappe phréatique située à 20 m de profondeur.



Puits cuvelé en béton de très grande profondeur (200 m) avec pompe électrique, dans le Souss (Maroc).



Chantier de forage dans le désert au Maroc pour capter une nappe d'eau très profonde.



52 Les eaux souterraines sont-elles potables ?

À l'état naturel, beaucoup le sont, du moins en pays sous climat tempéré, mais non toutes, surtout si l'on se réfère aux normes sanitaires internationales contemporaines (Organisation mondiale de la santé) dont la sévérité a progressé.

Sans parler des eaux naturellement un peu salées ou séléniteuses (sulfates), des eaux trop dures (calcaire) ou riches en métaux (fer, manganèse), inégalement nocives pour la santé, certaines eaux souterraines sont naturellement trop chargées en arsenic, en fluor, mais des traitements appropriés peuvent les rendre potables. D'autres défauts existent, cette fois imputables aux activités humaines polluantes, tels que des teneurs en nitrates supérieures à 40 mg/litre ou la présence de pesticides (moins faciles à identifier et à éliminer). Ces eaux font aussi l'objet de traitements correcteurs.

En France, il existe une carte simplifiée de la qualité des eaux souterraines les plus accessibles, qui montre que les défauts naturels sont assez localisés. Et les sites où la mauvaise qualité de l'eau souterraine est imputable aux activités humaines sont concentrées dans quelques zones urbaines, littorales ou industrielles.

L'eau
du robinet
provient-elle
des eaux
souterraines ?

L'homme a vite compris que boire les eaux de surface était parfois dangereux, il a donc cherché des sources ou creusé pour accéder à des eaux de la meilleure qualité possible. Cependant, selon les lieux, les eaux souterraines se sont progressivement dégradées. Les firmes industrielles se sont alors intéressées à l'exploitation des eaux non potables, qu'elles pouvaient traiter contre les micro-organismes, puis contre les polluants chimiques.

Aujourd'hui, l'eau souterraine reste très recherchée si elle se révèle de meilleure qualité que les eaux superficielles.

En France, la majeure partie des eaux potables distribuées provient de captage de sources ou de nappes souterraines :

3 510 millions de mètres cubes annuels, soit 64 % du total distribué en 2009. Les deux tiers des Français ont donc de l'eau

souterraine au robinet, une situation assez générale dans le monde et encore plus accentuée dans les zones arides, où l'eau souterraine est souvent la seule disponible pour mettre en place un réseau d'eau potable local.

53 Qu'est-ce qui fait d'une eau de source une eau « minérale » ?

Source d'eau ferrugineuse, à Urcuqui, vallée du Huarmiyacu (« mère de l'eau », en quechua), Équateur.

Dès l'Antiquité la plus reculée, les hommes ont attribué à l'eau de certaines sources, notamment lorsqu'elles présentaient des caractères particuliers (eau gazeuse, eau chaude), des vertus guérisseuses, voire quasi magiques (la « fontaine de jeunesse »), ou fécondatrices, sans parler des « sources miraculeuses ». Leur usage s'était particulièrement développé et organisé dans le monde romain.

Jusqu'au XIX^e siècle, ces eaux singulières ont été qualifiées de

« médicinales », et l'appellation « eaux minérales » est récente. Mais ce sont toujours des critères sanitaires et thérapeutiques qui fondent l'appellation contrôlée d'eau minérale, dépendant, en France, de l'Académie de médecine. La composition de ces eaux est censée être « favorable à la santé », ce qui recouvre des caractéristiques très diverses : eaux très peu minéralisées, proches d'eau de pluie, ou plates, ou gazeuses, ou plus riches en minéraux, même en dépassant les normes de potabilité.

Les cures d'eaux ferrugineuses ont un temps été considérées comme appropriées pour limiter l'addiction à l'alcool, ce qui a permis à l'humoriste Bourvil de s'exclamer : « L'alcool non, mais l'eau féru, l'eau ferrugineuse, oui ! » On les conseille aujourd'hui pour « remettre en forme ».

Les propriétés des eaux thermales fluctuent avec les croyances des hommes. Les eaux minérales sont devenues à la fois la matière première, consommée sur place, du thermalisme (c'est-à-dire de services thérapeutiques ou de « mise en forme ») et un bien de consommation banalisé, largement commercialisé en bouteille (dont la France est 1^{er} exportateur). À la différence des eaux « minérales », les eaux « de source » ou « de table » n'ont pas d'ambition sanitaire ou thérapeutique, mais elles sont toutes parfaitement potables.



Méprise sur les eaux minérales

Si on compare les compositions des eaux minérales – qui sont mentionnées sur leurs étiquettes – aux normes de potabilité internationales (celles de l'OMS), européennes ou légales en France, on voit que nombre de ces eaux ne sont pas conformes et dépassent les maximums autorisés pour une ou plusieurs composantes, par exemple les taux de sulfate, contrairement aux eaux du robinet distribuées partout.

En effet, en France, le code de la santé publique qui définit les « eaux minérales naturelles » ne fixe pas de teneur limite aux constituants jugés non dangereux pour la santé, à l'exception des nitrates. Il ne s'agit bien sûr que de défauts de composition chimique, car du point de vue bactériologique ou viral, toutes ces eaux sont potables. Mais les consommateurs qui remplissent leur chariot de bouteilles d'eau minérale dans les grandes surfaces font souvent emplette de toute marque sans connaître ses spécificités, avec la croyance que des eaux vendues 500 fois plus cher que l'eau du robinet ne peuvent être que meilleures !

Deux types d'eaux embouteillées, en Afrique du Nord : eau minérale et eau du robinet filtrée.



54 Depuis quand s'intéresse-t-on aux eaux thermales ?

« Thermal » vient du grec *thermos* (« chaud »). Chaque eau thermique se caractérise par un cheminement spécifique de l'eau dans le sous-sol, où des couches géologiques contribueront à la filtrer, à la charger en minéraux particuliers et à augmenter sa température.



Atrium
de l'hôtel
de l'Europe
à Aix-les-Bains.

Depuis la haute Antiquité, les hommes ont cherché à aménager les accès de ces sources chaudes. Le raffinement des thermes romains constitue sans doute l'apogée des usages codifiés de l'eau. Les bains successifs dans différents bassins chauds et froids et la vie sociale et culturelle associée à ses pratiques concernent d'abord les catégories sociales les plus aisées de la cité romaine.

Après la Renaissance, on redécouvre les propriétés thérapeutiques des eaux minérales et des eaux chaudes, parfois par des voies insolites lorsque certaines sources sont employées ou réemployées par l'armée pour soigner des blessés de guerre. Mais l'engouement pour les sites d'eau thermale en Europe a lieu au XIX^e siècle, quand les élites urbaines peuvent rallier ces villes facilement grâce au réseau de voies ferrées. Les villes thermales se transforment, adoptant une architecture spécifique, marquée par de grands hôtels luxueux associés à des établissements de jeu.

Au cours du XX^e siècle, leur fréquentation s'étend à de nouvelles catégories sociales. La codification plus précise des eaux minérales et chaudes avec la garantie de caractéristiques stables, ainsi que le suivi de leur qualité, confèrent aux centres spécialisés des labels de cures thermales prises en charge par la Sécurité sociale. Aujourd'hui, en France, près de 500 000 patients en bénéficient chaque année. Les propriétés thérapeutiques des eaux étant répertoriées, les curistes sont orientés vers tel ou tel établissement en fonction de leur pathologie et des traitements dispensés par les stations. À titre d'exemple, les chaînes thermales d'Auvergne proposent des soins diversifiés allant des cures d'eau minérale aux soins à base de

Deux hôtels
thermaux
à Aix-les-Bains.



vapeur thermale, en passant par les bains d'eau minérale avec jets massants, dans une gamme de traitements de la peau, des voies respiratoires ou des rhumatismes.

55 Les eaux souterraines peuvent-elles être une source d'énergie ?

Par sa température (et non par sa dynamique, à la différence des eaux de surface), l'eau souterraine est le principal vecteur de la géothermie.

La géothermie utilise l'eau souterraine peu profonde comme « source froide » pour les pompes à chaleur servant au chauffage individuel ou collectif. Cette méthode est en essor dans de nombreux pays européens, aux États-Unis, au Canada et au Japon. En 2002, 267 000 logements étaient équipés de pompes à chaleur dans l'Union européenne.

L'utilisation en « basse énergie » provient du fait que l'eau assez chaude (30 °C à 90 °C) d'aquifères profonds est directement employée pour le chauffage (immeubles, chauffage urbain, serres, pisciculture, balnéothérapie), le plus souvent grâce à des doublets de forages (pompage et réinjection). Cette utilisation est notable dans plusieurs pays riches en eaux géothermales, notamment en Islande, en Hongrie, au Japon, en Nouvelle-Zélande, ainsi qu'en Allemagne où, chaque année, 14 millions de mètres cubes d'eau géothermale étaient utilisés en 2004 ; par comparaison, en Chine, en 2004, 10 millions de mètres cubes par an étaient exploités à Beijing, 12 à Tianjin, 18 dans la province de Fujian. L'utilisation d'eau en basse énergie se développe aussi dans des régions aux eaux souterraines assez profondes normalement chaudes, par exemple dans le bassin de Paris, où 38 doublets de forages sont en service depuis vingt-cinq ans et, en 2012, assuraient le chauffage de 180 000 logements et de l'aéroport d'Orly.

L'utilisation en « moyenne et haute énergie » est celle des centrales géothermiques, qui exploitent des eaux très chaudes (plus de 90 °C), profondes, généralement salées et inutilisables à d'autres fins. Par ailleurs, dans les régions volcaniques, des gisements de vapeur sont utilisés pour la production d'électricité, notamment en Allemagne, Italie, Islande, Russie, Mexique, États-Unis (Californie), Indonésie, Philippines, Japon, Australie, Papouasie Nouvelle-Guinée, Nouvelle-Zélande,

Antilles françaises (Guadeloupe). En 2007, 350 installations géothermiques réparties dans le monde totalisaient une puissance de 9,7 gigawatts, soit 0,3 % de la production mondiale d'électricité. Le développement de la géothermie est prévisible parmi les sources d'énergies renouvelables sans impact nuisible.

56 Qu'advient-il des fuites des réseaux d'eau potable ?

Dans les réseaux urbains d'eau potable, les fuites peuvent être considérables, représentant parfois la moitié de ce qui a été produit et mis en mouvement dans le réseau principal. On cite souvent des villes dont les infrastructures sont anciennes et n'ont pas toujours été renouvelées à temps.

Chantier de rénovation des réseaux d'eau potable et d'assainissement à Montpellier.

Par exemple, on estime à 45 % les fuites du réseau principal de Nîmes, mis en place sous Napoléon III pour les quartiers du centre-ville.


En moyenne, le niveau des fuites des réseaux d'eau potable se situe entre 15 et 40 %.

Paris se distingue avec des fuites très réduites, dues au fait que son réseau principal d'eau potable a été installé dans le réseau principal des égouts de Paris, réalisé aussi sous Napoléon III. Les conduites sont accrochées aux voûtes des grands collecteurs d'eaux usées et pluviales, de sorte que la détection des fuites est rendue bien plus facile que dans les villes où les tuyaux sont enterrés et les fuites peu détectables.



Dans les réseaux urbains, les fuites dépendent de l'ancienneté des tuyaux, qui finissent par être poreux (pertes linéaires) et parfois se rompent localement (fuites ponctuelles). Un niveau élevé de pression dans un réseau ancien favorise le gaspillage de l'eau traitée, et augmente les consommations d'énergie pour assurer le service de l'eau. En outre, dans les parties privées, après le passage par les compteurs d'eau, des fuites se

Il existe aussi des fuites dans les réseaux d'assainissement qui reprennent les eaux usées et les renvoient vers des exutoires et des lieux de traitement. Ces fuites peuvent avoir des conséquences fâcheuses en termes de pollution des nappes. Cependant, ces phénomènes sont mal connus, et en général jamais renseignés, même dans les rapports des gestionnaires des réseaux. On y fait moins attention parce qu'il y a généralement des écoulements sans mise sous pression du réseau d'assainissement comme cela se fait pour l'eau potable.



Les fuites
des réseaux
d'égouts

produisent mais sont mal connues. Les niveaux de consommation atteignent parfois des chiffres extraordinaires, non seulement dus à des comportements de surconsommation plus ou moins ostentatoires (piscines, ouverture longue des robinets, lavages à grandes eaux), mais aussi à des fuites non maîtrisées comme celles des chasses d'eau ou des joints de robinets défectueux. La porosité des tuyaux dans les immeubles et les maisons est aussi responsable de pertes linéaires et de fuites ponctuelles. Ces fuites coûtent cher aux usagers. De plus, elles ont pour effet d'obliger les collectivités territoriales à investir dans des tuyaux plus gros pour assurer le service aux usagers.

Cependant, ces fuites classiques qui, globalement, peuvent représenter 10 à 40 % de la consommation selon l'état du réseau domestique et le comportement de l'utilisateur, parce qu'elles sont facturées, font partie intégrante de la gestion globale du système. Le paiement des fuites domestiques équilibre les budgets généraux de l'eau. Dans de nombreuses villes où des campagnes d'information sur le gaspillage de l'eau potable ont été menées, les citoyens ont pris conscience de leur responsabilité et ont mis en œuvre des comportements de réduction des consommations nettes de l'eau et des consommations liées à des installations défectueuses. Du coup, les gestionnaires de l'eau se trouvent confrontés à un «chiffre d'affaires» réduit, et des problèmes apparaissent entre la part de budget correspondant au fonctionnement quotidien du réseau et la part qui doit être consacrée aux investissements pour renouveler le réseau, changer les tuyaux, innover dans les traitements.

Quelle que soit la manière dont on en parle (pertes, fuites, gaspillages), l'eau qui s'échappe du circuit prévu ne se perd

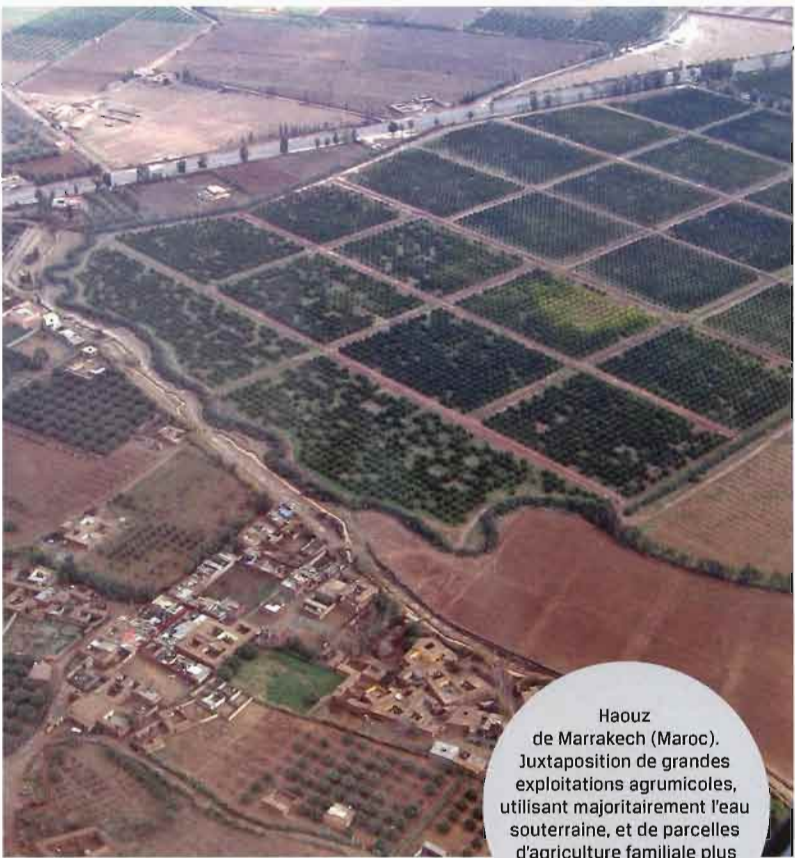
jamais définitivement. Cette eau entretient une nappe. Ainsi, les fuites d'eau du réseau d'eau potable de la ville de Montpellier semblent avoir entretenu la nappe phréatique sous le centre-ville, dont la qualité se révèle bien meilleure que celle d'une nappe d'eau naturelle, puisqu'elle vient d'une eau traitée pour être potable et non de l'eau de ruissellement. Mais ce phénomène, qu'on peut décrire comme une aménité positive sur l'environnement (autrefois, la nappe phréatique de Montpellier était considérée comme extrêmement polluée), s'acquiert à un coût élevé pour la société.

57 Où vont les fuites des réseaux d'eau agricole ?

En agriculture irriguée, les fuites semblent être un défaut sempiternel. Aujourd'hui, l'arrosage est souvent assimilé au gaspillage de l'eau. On le croit volontiers lorsqu'il s'agit d'arrosage gravitaire en planche ou à la raie, mais, dans les grandes cultures de certaines régions, la technique de l'aspersion provoque aussi un rejet. Pour comprendre cela, il faut suivre les chemins de l'eau agricole.

Historiquement, le développement de l'irrigation repose sur la dérivation des eaux courantes dans les rivières, au moyen de plusieurs ouvrages de prise en travers du cours d'eau. Il est très rare que ces ouvrages ne fuient pas. En fait, sur un cours d'eau, une prise ne prend presque jamais toute l'eau qui arrive. Du fait de la confrontation des intérêts locaux sur l'eau, des régulations sociales et institutionnelles ont été inventées pour organiser ces fuites d'ouvrages – que, dans le monde catalan, on appelle des «eaux superflues». Évidemment, il y a des limites à ces accords et, au bout de plusieurs prélèvements, la dernière prise finit par ne plus fuir.

Le canal qui transfère l'eau de la prise à la zone agricole mesure entre quelques centaines de mètres et quelques dizaines de kilomètres. S'il est simplement creusé dans la terre, l'eau s'infiltre, en particulier dans des sections sableuses. Mais, au fil du temps, le lit s'enrichit d'argiles et de limons qui combleront partiellement les passages de l'eau. En réalité, un canal en terre se comporte un peu comme une rivière en entretenant par ses fuites une humidité du sous-sol proche. D'ailleurs, les arbres plantés le long des berges des canaux sont les bénéficiaires



Haouz de Marrakech (Maroc). Juxtaposition de grandes exploitations agricoles, utilisant majoritairement l'eau souterraine, et de parcelles d'agriculture familiale plus dépendantes d'eau de surface.

immédiats des fuites. Les racines profondes récupèrent une partie de l'eau perdue.

On invoque l'inconvénient des fuites pour justifier le bétonnage des canaux anciens. Il peut être nécessaire de rendre imperméable certaines sections de canaux, mais d'autres raisons expliquent l'engouement pour cette « modernisation ». En bétonnant le canal, on supprime une tâche parfois difficile à réaliser dans des sociétés où l'esprit de solidarité s'est émoussé : plus de corvée de nettoyage, et surtout plus de conflit entre usagers pour les organiser au moins une fois par an. Le bétonnage supprime les fuites mais il tue les arbres. L'ombrage disparaît et l'évaporation directe du canal s'accroît. Dans les dernières décennies, les aménagements pour l'irrigation ont plutôt été réalisés avec des réseaux de tuyaux sous pression qui prenaient l'eau des rivières pour les distribuer à travers différentes bornes d'arrosage. Comme leurs alter ego urbains, les tuyaux vieillissent et finissent par perdre autant ou

plus d'eau que les canaux en terre. Ainsi, en 2012, la Compagnie nationale d'aménagement du bas Rhône-Languedoc a informé le public sur les fuites dans les réseaux sous pression qu'elle gère : 30 % de pertes. En fait, ces fuites se recyclent quand même, car elles contribuent à la recharge de nappes souterraines, mais au prix de dépenses très importantes.

Les champs qui sont arrosés ne le sont, en principe, pas tous en même temps. La répartition de l'eau entre plusieurs parcelles ou plusieurs familles et exploitations est l'objet d'arrangements complexes, variés et souvent pertinents pour atteindre les objectifs que se sont fixés les co-utilisateurs de l'eau. On ne peut pas entrer dans toutes les configurations possibles dans le cadre de ce livre, mais retenons simplement que l'eau passe de parcelle en parcelle selon des séquences plus ou moins prévues et contraignantes. Parfois, notamment quand les agriculteurs ont des cultures très différentes d'une parcelle à l'autre, avec des exigences en eau contrastées, le système collectif de répartition peut mal fonctionner et générer des fuites importantes, des pertes de temps et des conflits de voisinage. L'eau peut circuler de façon chaotique au sein du maillage des terres. Mais il y a sans doute beaucoup de progrès possibles si on aide les protagonistes à adapter leurs règles de partage aux disponibilités en eau et au contexte agricole et climatique.

Sur le champ lui-même, les techniques d'arrosage sont très variables : simple submersion de parcelles structurées par des diguettes, avancement de l'eau dans des raies parallèles, recours à des technologies d'aspersion et d'irrigation localisée (micro-asperseurs et micro-goutteurs). Il est évident que les deux premières techniques génèrent plus de fuites que les dernières, mais les différences sont parfois exagérées.

On a vu que les eaux perdues de l'arrosage gravitaire contribuent toujours à la recharge de la nappe. Cela peut être un objectif recherché par une collectivité, ou bien une aménité, c'est-à-dire une conséquence positive, même si elle est méconnue ou mal considérée. Par exemple, dans l'ouest de Marrakech, les petits paysans de la tribu des Ait Immour qui arrosent par submersion leurs lopins de terre font remonter la nappe souterraine. À la périphérie de leurs terroirs, de grandes exploitations modernes soutirent une grosse partie de l'eau qui leur est nécessaire en pompant dans cette nappe. Ici, les fuites du système des plus pauvres sont de précieux apports gratuits pour le système des plus riches (voir photo p. 93).

58 Comment des civilisations ont-elles pu se développer loin des fleuves ?

Certaines régions du monde ont évolué en utilisant systématiquement les eaux souterraines captées par des galeries drainantes, disposées de manière empirique à distance les unes des autres. On parle parfois de « civilisation des qanats » pour désigner l'Iran, et la gestion des eaux cachées a permis un développement culturel, intellectuel, social et économique dans l'ensemble des pays orientaux. L'art d'accéder aux eaux souterraines est connu du Japon à la Chine, du centre de l'Asie à la péninsule Arabique, dans l'Orient méditerranéen et dans toute l'Afrique du Nord, mais il est aussi remarquable chez de nombreux pays riverains de la Méditerranée.

À certains moments de l'histoire, les eaux souterraines sont mobilisées pour établir des cités prestigieuses, centres de pouvoir et bases de rayonnement culturel ou religieux. Ainsi, depuis sa fondation jusqu'au ^{xx}^e siècle, Marrakech dépend entièrement des eaux souterraines, ramenées vers elle par des centaines de khattaras (nom marocain des galeries drainantes). En Espagne, Madrid est conçue au ^{xvi}^e siècle selon le même principe d'alimentation en eau, par le transfert des eaux souterraines sur de longues distances. Dans la péninsule Ibérique, on parle explicitement de mines d'eau, expression qui renvoie à la double filiation culturelle des sociétés qui ont mis en œuvre ces infrastructures : la culture du cultivateur arrosant les champs, vergers et jardins, défiant la sécheresse par l'art de conduire l'eau et de la partager avec ses voisins proches ou lointains ; la culture du mineur, capable d'entreprendre avec des outils simples des galeries de plus en plus longues et difficiles à entretenir.

Pour autant, dans la mesure où la recharge des nappes qui alimentent les galeries dépend en partie des épisodes de crue des cours d'eau de surface, les civilisations des eaux cachées s'articulent aussi avec des civilisations fluviales. En Égypte, par exemple, dans les oasis de Kharga, on a recherché les eaux souterraines en creusant des galeries, mais cette période n'a pas duré très longtemps et c'est la gestion du fleuve Nil qui a marqué durablement la civilisation égyptienne.

Parmi les civilisations de l'Antiquité, on peut souligner que, si les Étrusques et les Carthaginois avaient développé des

captages d'eau souterraine, la civilisation romaine a quelque peu délaissé cette ressource pour développer l'art des transferts d'eau superficielle à grande échelle.

59 Peut-on creuser un puits partout ?

Au sens de la faisabilité technique et non du droit d'entreprendre les travaux, on peut creuser un puits presque partout. La seule réserve concerne l'accessibilité du lieu pour l'installation d'un chantier par un puisatier ou la mise en place d'une machine de forage, puis pour le raccordement d'une adduction d'eau. Sont donc à exclure les reliefs de haute montagne et les terrains inondables. En outre, le forage d'un puits est inégalement faisable suivant le terrain : il est plus difficile et plus coûteux dans une roche très dure ou dans un sous-sol éboulé. De plus en plus, la technique du forage est préférable à celle du puits, surtout à grande profondeur (plus de 100 m), et même en assez grand diamètre.

Mais la présence prouvée ou très probable d'une nappe souterraine conditionne l'entreprise de creusement d'un puits. Beaucoup de régions du monde, mais non la totalité, comportent des eaux souterraines accessibles et exploitables. La consultation d'une carte hydrogéologique, lorsqu'elle est disponible, peut fournir l'information voulue. Sinon, on a recours à l'expertise d'un hydrogéologue.

Lorsqu'il existe encore des galeries drainantes collectives, le creusement de nouveaux puits par des individus à titre privé pose des problèmes de connaissance de la ressource, de coût énergétique et de modification des conditions du transfert de l'eau : des dépenses de pompage interviennent et la circulation gravitaire de l'eau est modifiée, pour les galeries. Les questions de concurrence entre dispositifs voisins doivent être abordées afin de limiter les conflits d'usage. Enfin, la coexistence de différents dispositifs suppose une certaine gouvernance collective. Les risques de surexploitation sont toujours présents, d'autant plus que les techniques verticales ont beaucoup évolué avec la substitution des forages profonds aux puits traditionnels.

60 Pourquoi oppose-t-on l'image des puits à celle des sources ?

La plupart des gens imaginent que les puits font sortir l'eau de la terre par une élévation forcée, tandis que les sources sont perçues comme des sorties naturelles d'eau venant de la terre et coulant par gravité. Cette opposition de sens se retrouve dans certaines approches scientifiques qui compartimentent le système hydrogéologique en flux entrant et sortant. En fait, ces métaphores nuisent à la bonne compréhension de la réalité de l'eau, car les puits ont des fonctions analogues aux sources :

- par rapport aux ressources, le prélèvement par puisage est bien une sortie artificielle des systèmes aquifères exploités, complémentaires des sorties naturelles formées par les sources. C'est d'ailleurs évident pour les puits artésiens, lorsque l'eau jaillit toute seule (voir question 66);
- par rapport aux utilisateurs, la fourniture de l'eau du puits est bien une entrée dans l'espace d'usage de l'eau qu'ils maîtrisent, comme peut aussi l'être l'arrivée de l'eau d'une source immédiatement utilisée, ou encore le captage d'une partie du débit d'une rivière.

Certains puits peuvent servir à des évacuations d'eau excédentaire en surface ou d'eau usée, ou à des injections pour la recharge artificielle d'une nappe souterraine. Ces cas restent assez rares, mais se développent comme réponse partielle aux crises de rabattement excessif d'une nappe. Un exemple éloquent à Abou Dhabi est signalé par Alain Carriou (2013) : actuellement, l'émirat dirige à grands frais une partie de l'eau dessalée qu'il produit en bord de mer vers l'oasis intérieure de Liwa, où l'eau est injectée par des puits dans un aquifère souterrain afin de reconstituer une réserve stratégique en eau douce pour les futurs besoins urbains et agricoles.

La seule différence essentielle entre puits d'extraction de l'eau et source est que, dans un puits, on impose en puisant un débit et on provoque ainsi la baisse du niveau de l'eau souterraine, tandis que dans le captage d'une source, le niveau est conservé ou seulement un peu abaissé, et on recueille un débit dont les variations sont naturelles.

61 Où se trouvent les plus vieux puits du monde ?

L'archéologie des puits est fort pauvre en regard de celle des tombes ou des temples. Pourtant, il n'est pas douteux que l'art de creuser des puits pour s'approvisionner en eau a débuté dans des temps protohistoriques en différentes régions du monde, associé aux civilisations naissantes et aux premières cités. Dans les régions qui connurent un essor exceptionnel sur la base du développement hydraulique et de grands aménagements de surface, on parle de « civilisations hydrauliques ». Il conviendrait aussi d'évoquer les civilisations des eaux souterraines, qui recouvrent en partie les précédentes, mais qui peuvent exister sans lien avec des aménagements de surface. Les premiers puits auraient été creusés dès le VI^e millénaire avant J.-C. en Mésopotamie (dans l'actuelle Syrie et en Irak), puis dans les cités sumériennes (dans le sud-est de l'actuel Irak). Dans la première écriture (vers le IV^e millénaire avant J.-C.), un idéogramme représentant un carré avec un point central symboliserait la notion de puits. Dans la vallée de l'Indus, au V^e millénaire, la cité de morts de Mohenjo-Daro comptait environ 700 puits dans les habitations. En Israël, le peuplement de Béersheva aurait débuté, selon les archéologues, après le creusement de puits vers 5500 avant J.-C., et c'est là qu'Abraham aurait creusé le puits qui a donné son nom à la cité (« le puits du serment » ou « des Sept ») vers - 2000. Des puits anciens doivent aussi se trouver en Chine, puisqu'un poème célèbre, vers 2300 av. J.-C., l'art de creuser un puits. En Europe, le puits le plus ancien se trouverait à Vinča, en Serbie, daté (grâce au carbone 14) aux environs de l'an - 4240. Dans de nombreux pays comme la Palestine et l'Inde, de nombreux puits remonteraient au II^e millénaire av. J.-C.

62 Les puits sont-ils toujours verticaux ?

Puits et forages sont généralement verticaux. Seule la technique de création les distingue. Un puits est un conduit creux creusé la plupart du temps à la main, et donc d'une section assez large pour que l'homme puisse s'y tenir jusqu'à atteindre la zone où l'eau est présente dans la roche.

Ce paysage de terrasses, à Ribes, a été classé par le ministère de l'Environnement.

Un forage est créé par une machine, qui creuse sur une section limitée à celle du tuyau disposé au fur et à mesure de l'enfoncement de la tête foreuse.

Si le percement d'un puits est vertical, il peut y avoir des dispositifs complémentaires dans la zone imbibée d'eau. Autrefois, pour faciliter l'arrivée d'eau au centre du puits, des galeries horizontales rayonnantes

étaient creusées à partir de son fond. Aujourd'hui, dans le même but, on ajoute des forages rayonnants.

Par ailleurs, les galeries de captage, souvent aménagées à flanc de coteau dans les terrains aquifères discontinus et fissurés, comme les roches calcaires, volcaniques ou granitiques, sont parfois appelées « puits horizontaux » (voir question 70). Dans ce cas, l'eau n'a pas besoin d'être « puisée » : elle coule à la sortie de la galerie. C'est le cas à Ribes, en Ardèche.



Galerie de la Coste, à Ribes. Dégagement des sables et roches pour rétablir l'écoulement vers l'exutoire.

63 Existe-t-il des formes particulières de puits ?

La forme circulaire est la plus fréquemment rencontrée dans les puits car la plus appropriée à leur forage. C'est aussi celle qui assure le mieux la solidité de leur paroi, surtout lorsqu'il faut revêtir cette dernière d'un cuvelage maçonné, en terrain non consolidé (beaucoup de couches géologiques ne sont pas stables lorsqu'on les creuse et s'effondrent si on ne renforce pas le puits). Les puits carrés sont donc rares... pourtant on en voit un dans un tableau célèbre de Pieter Bruegel de 1559, *Combat entre Carnaval et Carême*, visible au Kunsthistorisches Museum de Vienne. Mais peut-être la margelle seule a-t-elle

cette forme inhabituelle ? Dans les oasis des régions arides (notamment dans le Maroc présaharien), les puits équipés d'appareil de puisage traditionnel pour l'irrigation sont souvent carrés ou rectangulaires.

D'autres puits peuvent avoir des formes très singulières, comme une spirale qui permet de descendre en marchant à proximité de la nappe phréatique. On en trouve en Afrique de l'Est et au Pérou.

64 Pourquoi l'eau des puits n'est-elle pas toujours potable ?

Si on trouve un défaut à l'eau d'un puits, il fait partie des caractéristiques de l'eau de la nappe. Cependant, l'eau du puits est parfois souillée du fait d'une mauvaise protection des bords du puits, d'une intensification des usages et d'une concentration élevée de polluants et de matières fécales. Les pollutions de proximité peuvent être corrigées par un réaménagement assurant l'intégrité de l'eau.

Par contre, les causes de dégradation de l'eau dues aux activités humaines (habitat, agriculture, artisanat, industrie) sont plus difficiles à comprendre lorsqu'elles sont indirectes et éloignées. Et il est aussi plus compliqué de suivre ces pollutions dans leur déplacement et d'en limiter les effets. Ce problème se pose à plusieurs échelles : dans le bassin souvent très large de l'alimentation de la nappe, dont l'étendue n'est pas toujours précisément connue, et dans des secteurs plus localisés de la nappe donnant de l'eau à un ou plusieurs puits.

Si l'infiltration de l'eau se produit rapidement dans des sols peu filtrants et que l'eau réapparaît très vite à la surface par des sources naturelles ou par des pompes artificielles, l'impureté de l'eau crée d'énormes risques. On cite souvent le cas de l'arsenic qui s'est concentré dans la nappe phréatique, au Bangladesh. À l'origine, l'arsenic contenu dans les sédiments provenant de l'Himalaya n'était pas directement soluble dans l'eau. Sous l'effet de la concentration de matières organiques dans des bassins proches des maisons, des micro-organismes l'ont rendu soluble et il a atteint la nappe souterraine qui servait de ressource en eau potable pour des centaines de milliers de personnes ayant mis en place de petits forages.

65 Jusqu'ou peuvent descendre les puits ?

Creusés manuellement avec des outils rudimentaires, les puits descendent généralement de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Une fois la partie supérieure de l'aquifère atteinte, le creusement se fera avec de plus en plus de difficultés. Pour autant, rien n'est définitivement stable dans les niveaux de l'eau souterraine : les phases climatiques sèches et la multiplication de puits concurrents conduisent au rabattement de la nappe. Une pratique assez courante est de surcreuser un puits de quelques mètres supplémentaires et de répéter l'opération autant de fois que cela apparaît nécessaire au détenteur du puits.

Le creusement manuel de puits atteint parfois les limites de l'humainement possible. La raréfaction de l'air et le danger d'effondrement interviennent dans ces conditions, tout comme le risque de rencontrer un obstacle infranchissable avec les outils disponibles. Dans le Haouz de Marrakech, des puisatiers arrivent quand même à creuser à la main des puits approchant 100 m de profondeur. Ils utilisent une chandelle, qui peut les prévenir du manque d'oxygène si la flamme commence à faiblir. Plus au sud, dans la région du Souss, les puisatiers creusent à la main des puits de 250 m de profondeur, sans doute un record. La diffusion des techniques de forage industriel est en grande partie responsable de creusements aussi profonds et bien au-delà, puisque, dans certains pays du monde, on atteint des nappes situées à plus de 1 000 m sous le niveau du sol.



Creusement à la main d'un puits dans le Tafilalet (Maroc).

66 Qu'est-ce qu'un puits artésien ?

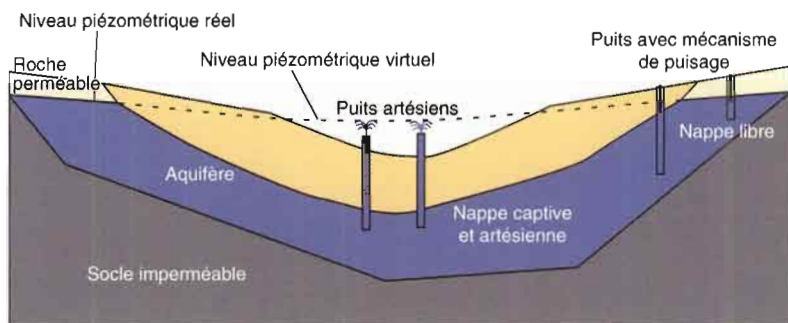
Un puits ou un forage qui atteint une nappe souterraine plus ou moins profonde sous pression assez élevée pour faire jaillir l'eau, au moins initialement, est dit « artésien ». Le mot vient de la province d'Artois, en France, au nord du bassin parisien,

car on y a fait, au Moyen Âge, les premiers puits jaillissants. Mais de tels puits avaient été réalisés en Chine ou en Égypte dès l'Antiquité.

Le jaillissement de l'eau est lié à la conduite forcée de l'eau présente dans une couche de roche assez perméable comprise entre deux couches de faible perméabilité, par exemple une couche de sable entre deux couches d'argile. La pression de la nappe captive dépend de l'altitude des zones où l'aquifère est plus proche du sol et alimenté par les infiltrations. Selon la structure géologique régionale, dans certaines zones, le niveau de l'eau dans les puits atteignant la nappe profonde peut être plus haut que le toit de l'aquifère – ce qui rend la nappe captive – et même plus haut que le sol, ce qui fait jaillir l'eau des puits artésiens. Mais ce jaillissement fait baisser la pression dans l'aquifère et cesse à la longue.

En France, les premiers puits artésiens profonds (plusieurs centaines de mètres) ont été réalisés au XIX^e siècle en Touraine et à Paris où, en 1841, le célèbre puits de Grenelle conçu par Arago a fait jaillir 160 m³/heure d'eau de la nappe des « sables verts », atteinte à la profondeur de 548 m et dont le niveau d'équilibre s'établissait à 33 m au-dessus du sol.

Principe
des nappes
et puits
artésiens



67 D'où vient l'eau des oasis ?

Dans les oasis, différentes eaux sont utilisées, avec des combinaisons locales spécifiques. L'oasis reçoit quelques pluies directes mais évidemment fort rares. Parfois, des impluviums périphériques les accueillent avant qu'elles remplissent des

réservoirs creusés dans le roc ou aménagés à l'abri du soleil et des vents desséchants. Cette ressource, souvent très aléatoire, intervient plutôt comme complément à une eau d'autre origine. La fondation des oasis correspond le plus généralement à la découverte d'une eau d'origine pérenne : une ou plusieurs sources naturelles superficielles qui, au fil du temps, ont pu être modifiées, une nappe ou un flux souterrain.

Le mot « oasis » vient du copte *ouahe* désignant un site de vie sédentaire et d'agriculture qui dispose de ressources locales et permanentes en eau, dans le désert occidental égyptien. Ce terme a été repris dans le mot arabe *wāha*, nom devenu générique, qui sert à décrire tous les lieux similaires dans de nombreux déserts du monde.

Aujourd'hui, l'eau des oasis a presque toujours une origine souterraine : soit elle vient de sources artésiennes pérennes provenant d'une nappe profonde captive, à la faveur d'un accident géologique ; soit de puits ou forages initialement artésiens, à présent souvent pompés ; soit encore, dans des zones proches de montagnes moins arides, elle vient de l'exploitation par des galeries de type qanat d'une nappe phréatique localement tributaire de crues épisodiques.

68 Qu'est-ce qu'une galerie drainante ?

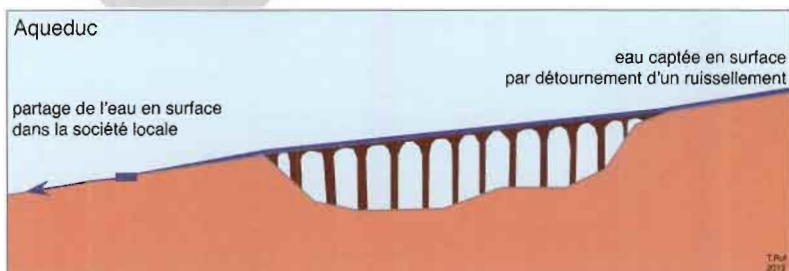
Une galerie drainante peut être décrite comme une mine d'eau, sorte de puits presque horizontal. La galerie permet d'intercepter et de drainer partiellement un écoulement souterrain permanent fourni par une nappe plus ou moins proche mais plus élevée que l'exutoire, et cela sans dépense d'énergie pour relever l'eau, comme pour les puits verticaux. « Permanent » ici ne signifie pas « constant », car le débit peut varier en fonction des niveaux de la nappe interceptée, des rythmes de recharge saisonniers ou annuels, et des influences réciproques des galeries entre elles, si plusieurs mines sont établies dans le site considéré.

Les mines d'eau courtes de quelques dizaines de mètres n'ont pas de système d'aération. En revanche, les galeries drainantes les plus longues doivent être équipées de puits verticaux de visite et d'aération. Elles se présentent comme un long aqueduc à l'envers (voir le schéma ci-après) : la ligne d'eau est en bas de l'ouvrage au lieu d'être en haut. Pour un aqueduc,

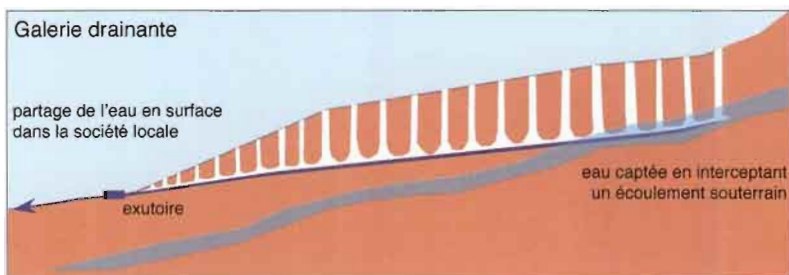
la ligne d'eau est placée sur un ouvrage formé de colonnes maçonnées pleines et d'arches au-dessus du vide. Pour la galerie drainante, la ligne d'eau est dans un tunnel voûté avec des segments compris entre des colonnes vides (les puits de visite). Dans les deux cas, le but est de transférer de l'eau disponible située à une certaine altitude vers une zone où elle sera utilisée à une plus basse altitude, cette destination ne pouvant être atteinte naturellement sans aménagement, et à partir de l'exutoire, l'eau sera partagée sur un périmètre souvent très précisément délimité. Dans leur monumentalité, les deux dispositifs se ressemblent mais l'aqueduc est un moyen de transport, et la galerie un instrument de captage.

Les galeries drainantes sont appelées *qanat* en Iran, *karez* en Asie Centrale et en Chine, *aflaj* à Oman, *foggara* en Algérie, *khettara* au Maroc, *minas de agua* en Espagne. En France, le terme usuel est « source », même si elle a la forme de la mine d'eau.

Galerie drainante et aqueduc, deux facettes de civilisations hydrauliques anciennes.



L'aqueduc aux colonnes pleines franchit le vide pour transférer par gravité l'eau de surface visible et disponible de l'amont vers une zone de demande plus basse qui serait restée inaccessible sans l'ouvrage.



La galerie drainante intercepte une eau cachée souterraine qu'elle transfère par gravité avec l'aide d'un tunnel et de colonnes vides vers une zone de demande plus basse qui serait restée inaccessible sans l'ouvrage.

Les plus grands qanats d'Iran disposent de galeries allant jusqu'à 100 km et assurant le transfert de l'eau vers des zones importantes, souvent des villes et des lieux de pouvoir politique et économique. Les foggaras algériennes ou les khattaras marocaines atteignent plusieurs kilomètres de longueur.

69 Toutes les villes anciennes ont-elles leurs galeries drainantes ?

Les villes n'ont pu surgir et constituer une forme d'habitat social qu'en maîtrisant un accès minimal à l'eau et en traitant son évacuation après usage. De nombreux travaux archéologiques montrent l'ingéniosité des peuples pour dériver les eaux courantes et les amener au cœur des villes. Les eaux souterraines sont aussi mobilisées, le plus souvent au moyen de puits verticaux et, pour des sites particuliers, là où les conditions s'y prêtent, de galeries drainantes. Tous les dispositifs se combinent, y compris la récupération des eaux de pluie tombées sur les toits ou dans les cours et conduites dans des réservoirs souterrains, à l'abri de la lumière. Parfois, des impluviums étaient aménagés sur des versants proches et l'eau pouvait remplir de grandes citernes creusées dans le sol, éventuellement interconnectées.

Rome est souvent présentée comme une ville alimentée par de grands aqueducs. Mais les eaux amenées dans la ville passaient aussi dans des tunnels réalisés avec les mêmes techniques que les galeries drainantes. De même, l'aqueduc romain de Nîmes ne fait pas que franchir la vallée du Gardon au moyen du pont du Gard, il emprunte différents tunnels au long des 50 km de son parcours. Dans ces exemples, les tunnels de puits d'aération n'assurent qu'un transfert d'eau superficielle déjà captée en amont et non la récupération des eaux souterraines. Cependant, les recherches récentes de Haurillon et Tardy (2013) montrent que des galeries drainantes auraient bien été réalisées à l'époque gallo-romaine à proximité de Béziers, probablement en lien avec la ville toute proche.

L'utilisation des galeries drainantes pour alimenter des cités nouvelles en développement dans des univers relativement secs est clairement établie pour certaines villes, comme Madrid. Malgré le caractère très chaud et aride du lieu, situé au bord de la rivière Manzanares, au débit incertain, le site était

connu au début du Moyen Âge comme riche en eau souterraine. Les historiens proposent d'ailleurs des interprétations différentes du nom de la ville. Pour les uns, le nom dérive de *Mayrit*, la mère des eaux (*ma* signifie « eau » en arabe) – en référence à une citadelle fondée au IX^e siècle par Mohammed I^{er}, émir de Cordoue. Pour d'autres, *Mayrit* serait une arabisation du terme *arroyo madre*, lui-même dérivé du latin, qui signifie « ruisseau mère », dans le sens d'un ouvrage artificiel.

Quelle que soit l'origine de son nom, Madrid s'est développée jusqu'au XIX^e siècle grâce aux nombreuses galeries drainantes qui lui apportaient une eau saine, tirée des nappes souterraines périphériques. Plus au sud, le Maroc connaît une évolution similaire à partir du XIII^e siècle avec l'implantation de la nouvelle capitale almoravide dans un site aride, Marrakech. Les premières galeries sont implantées sous la direction de l'architecte Obeidallah ibn Younes, et la ville comme la palmeraie associée vont être progressivement équipées de centaines de galeries (*khattaras*). Certaines datent même du milieu du XX^e siècle. Aujourd'hui, quasiment toutes les 600 *khattaras* de Marrakech sont taries et abandonnées, mais leur trace dans le paysage est omniprésente, comme on le voit sur la photo ci-dessous.

Vue aérienne de 3 *khattaras*, près de Marrakech. La distance entre deux puits est de 20 m.



On considère que les premières galeries drainantes, les qanats, ont été mises en place en Perse, vers 2500 avant J.-C. La diffusion de la technique fut certainement encouragée sous le régime achéménide dans toute la Mésopotamie et au-delà, vers l'Indus et l'Égypte. Un des facteurs de l'adoption du qanat comme élément de développement hydraulique était alors l'exemption, pour les cinq générations qui suivaient celle de la construction de la galerie, de taxes sur les revenus réalisés grâce à ces galeries. Cette mesure fiscale, sans doute temporaire en Perse, n'a pas été appliquée dans l'ensemble des zones arides et semi-arides qui ont utilisé la technique. Cependant, les connaissances nécessaires à l'établissement de qanats ont certainement suivi les principales routes d'échange, comme les routes de la soie vers l'Asie centrale et la Chine. En Méditerranée, l'Égypte connaît une phase de construction ancienne durant le I^{er} millénaire avant J.-C., mais elle semble limitée dans le temps et localisée dans les oasis occidentales. À partir du VII^e siècle, de nouveaux essors dans le domaine hydraulique, notamment dans celui des galeries drainantes, accompagnent la diffusion de l'islam. Ainsi, à l'ouest de la Méditerranée, des galeries ont été établies aux alentours de l'an 1000 en Algérie, sous le nom de *foggara*, et au Maroc, sous le nom de *khetarra*. Dans la péninsule Ibérique, la technique est employée à l'époque arabo-andalouse et continue de l'être après la Reconquête catholique.

Néanmoins, dans une région donnée, il est difficile de dater avec précision la plus ancienne galerie. Car il est rare d'avoir un inventaire systématique de toutes les galeries drainantes et d'être capable de toutes les prospecter, galeries tarées ou galeries encore vives. Ensuite, l'histoire d'une galerie est fort complexe, la galerie ayant évolué en fonction des décisions humaines liées aux difficultés climatiques et politiques. L'entretien d'une galerie est en effet nécessaire à son bon fonctionnement dans la durée.

Mais l'abaissement du niveau de la nappe souterraine implique soit l'abandon pur et simple de l'ouvrage et la disparition du groupe qui l'utilisait, soit la reconfiguration de la galerie pour retrouver une zone captante (voir question 85). Dans ce cas, le groupe d'utilisateurs a pu opter soit pour un rallongement du tunnel dans l'espoir de recouper le niveau de la nappe, soit pour le surcreusement de toute la galerie pour arriver au même résultat (mais cela implique aussi le déplacement vers l'aval de la zone d'usage de l'eau, ce qui n'est pas toujours possible). Connaître l'histoire collective composée de différentes séquences qui expliqueraient le développement ou l'abandon des qanats semble plus important que dater la plus ancienne galerie.



L'histoire des
plus anciennes
galeries
drainantes

70 Qui utilise aujourd'hui des galeries drainantes ?

Si, dans certains pays, les galeries drainantes sont maintenant devenues des vestiges archéologiques témoins de civilisations hydrauliques anciennes, le principe des mines d'eau n'a pas disparu malgré maintes difficultés connues pour en assurer l'entretien et l'usage. Du Japon au Pérou en passant par les pays d'Asie centrale, du Moyen-Orient, du Proche-Orient et de la Méditerranée, des communautés perpétuent la technique et mettent toujours en pratique une certaine gestion collective de l'eau souterraine, que l'on peut opposer aux formes très modernes de pompage motorisé gérées par des individus dans le cadre de grandes exploitations agricoles.

Certes, toutes les galeries drainantes n'ont pas la même histoire et surtout ne font pas l'objet des mêmes politiques publiques. Au nord-ouest de la Chine, dans le Xinjiang, l'oasis de Turfan est l'une des plus profondes dépressions au monde. Et l'un des sites les plus importants de création des *karez* : des centaines de galeries drainantes parallèles dont beaucoup restent en usage. L'oasis dispose d'un beau musée installé sur une des galeries vives où le visiteur peut descendre et suivre une portion du parcours pour comprendre la construction et le fonctionnement du système souterrain.

En Asie centrale, l'Iran est aujourd'hui le pays qui dénombre le plus de galeries drainantes, 50 000 qanats ont été identifiés dans les années 1950 et, bien que ce pays connaisse aussi la compétition sur les nappes et les problèmes de surexploitation, plusieurs milliers de galeries restent fonctionnelles aujourd'hui. Considéré comme le foyer central de l'invention des galeries drainantes, le pays dispose également d'un centre muséographique important sur les qanats. Situé à Yazd, au centre de l'Iran, le Centre international sur les qanats et les structures hydrauliques historiques est lié à l'Unesco et joue un rôle important dans la recherche et la diffusion des connaissances sur les galeries drainantes du monde entier.

Les rives sud et nord de la Méditerranée ont elles aussi des sites remarquables, qui se distinguent par l'ampleur et l'origine des eaux. Dans les oasis de la rive sud, comme dans la péninsule Arabique et en Iran, la présence à relativement faible profondeur de nappes souterraines et d'inféoflux (écoulements

souterrains dans le lit des rivières) a rendu possible la création de nombreuses galeries drainantes. Dans le sud de la Tunisie, les ressources en eau des oasis dépendaient de sources naturelles, souvent situées dans des « corbeilles » (des espaces resserrés contenant plusieurs exutoires de la nappe), comme à Tozeur ou Nefta. Cependant, quelques autres galeries tunisiennes ont été recensées dans le programme de recherche mené par l'institut italien Ipogea, sur les ouvrages hydrauliques anciens de la Méditerranée.

En Algérie et au Maroc, des milliers de galeries drainantes ont été creusées. Si les oasis de Timimoun, de Jorf dans le Tafilalet, de Tinghir et de Skoura sont toutes très dépendantes de ces ouvrages, la ville de Marrakech et sa palmeraie sont très concernées par l'histoire des galeries, qui desservent non seulement des jardins et des zones agricoles mais aussi des quartiers urbains à l'intérieur de la Médina. Aujourd'hui, en Algérie, le gouvernement a mis en place une politique d'inventaire et de sauvegarde des foggaras. Au Maroc, l'usage des khattaras est le fait de communautés locales souvent appuyées par des associations de migrants qui s'intéressent au patrimoine et considèrent que les galeries, lorsqu'elles sont toujours vives, rendent de très grands services aux populations locales.

Sur la rive nord de la Méditerranée, les galeries drainantes correspondent plutôt à des mines cherchant à intercepter des veines d'eau dans les montagnes. On les appelle d'ailleurs ainsi en Espagne et au Portugal. En France,

La galerie de Montady (Hérault), longue de 1 km.






**Le singulier
paysage
radioconcentrique
de l'étang desséché
de Montady.**

on en a créé de nombreuses dans le Lubéron et dans les Cévennes, par exemple à Ribes, dans la vallée de la Baume, où des centaines de sources sont constituées de galeries de plusieurs dizaines de mètres allant chercher les eaux souterraines dans le versant. Elles sont toujours utilisées pour l'arrosage des jardins et de cultures maraîchères. Ce système est d'ailleurs très ingénieux car, après le prélèvement d'eau sur une ligne de sources élevée, plusieurs autres lignes de sources en dessous récupèrent en grande partie les eaux perdues dans l'arrosage des terrasses supérieures.

En Languedoc, une galerie drainante exceptionnelle a été construite au milieu du ^{XII}^e siècle, à Nissan-lez-Enserune (près de Béziers), pour faire passer les eaux de drainage de l'étang desséché de Montady. D'un côté, la galerie évacue les eaux qui, sans elle, s'accumuleraient dans l'étang; de l'autre, elle apporte cette eau aux prairies et à un autre étang toujours en eau. Elle vient d'être classée monument historique, et le paysage de l'étang est aussi considéré comme un paysage agricole exceptionnel, du fait de son organisation radioconcentrique. Estimer aujourd'hui l'importance des galeries drainantes en termes d'impact sur l'agriculture et l'environnement est hasardeux faute de données fiables partout. L'ensemble des débits dérivés serait de l'ordre de 500 m³/s, soit 16 milliards de mètres cubes par an. C'est proche du débit moyen de la Seine. Le Centre des qanats d'Iran estime que les galeries drainantes irriguent aujourd'hui 1,5 million d'hectares dans le monde, ce qui représente moins de 1 % des superficies irriguées sur le globe. En volume d'eau souterraine, les galeries drainantes emploieraient seulement 2 % de l'exploitation globale actuelle, qui approcherait 1 000 milliards de mètres cubes par an d'eau.



L'eau

fragile

71 Peut-on disposer librement de l'eau qui passe dans son sous-sol ?

Selon le code civil, en France, la propriété du dessus emporte celle du dessous, donc celle du sol entraîne celle du sous-sol, y compris de l'eau souterraine qui s'y trouve. Cependant, la propriété d'un bien naturel mobile, tel que l'eau qui coule lentement dans le sous-sol de son terrain, ou l'eau de rivière qui le borde, a plutôt le sens d'un droit de prélèvement et d'usage de la partie que l'on extrait. Sous réserve de ne pas porter préjudice à un voisin ou à la collectivité.

En effet, la loi de 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques indique que le droit à l'eau potable s'exerce dans le cadre des droits antérieurement établis, dans des conditions économiquement acceptables par tous. Certaines habitations isolées ou groupées en hameaux se trouvent dans l'impossibilité d'être raccordées à un réseau collectif public, parce que les collectivités territoriales ou les délégataires de service public ne peuvent réaliser ces travaux à un coût raisonnable. Les propriétaires de ces terrains situés hors de la zone de desserte du réseau de distribution publique sont en droit d'établir une

alimentation en eau propre, par exemple avec un forage. En vertu du code minier, si l'existence d'une nappe phréatique accessible est connue ou prévisible, creuser un puits dans son jardin implique seulement l'obligation de déclaration à la commune ou à la communauté de communes (si elle en a la compétence), et seulement si le puits envisagé est profond de plus de 10 m et si on prévoit de prélever plus de 8 m³ par heure, ce qui est bien supérieur aux besoins domestiques courants. Si un ou plusieurs propriétaires de terrains non raccordés déposent un permis de construire une maison, ils peuvent donc assumer seuls leur desserte en eau potable en déclarant un puits ou un forage auprès du maire de la commune. Celui-ci n'est pas habilité à vérifier la productivité du forage, seuls les propriétaires en ont la responsabilité.

Qu'ils soient particuliers ou publics, et quels que soient l'usage de l'eau et le débit puisé, les puits servant à tirer de l'eau d'une nappe phréatique ou profonde exploitent tous une ressource en eau souterraine commune à tous les utilisateurs d'un même aquifère. En France comme dans la plupart des pays du monde qui ont adopté des législations voisines, de très nombreux puits et forages ne sont pas déclarés, et certains d'entre eux ont pourtant largement dépassés les limites de profondeur et de débit au-delà desquelles il faut une autorisation et un dispositif de mesure du prélèvement dans la nappe.

72 Quelle quantité d'eau souterraine extrait-on dans le monde ?

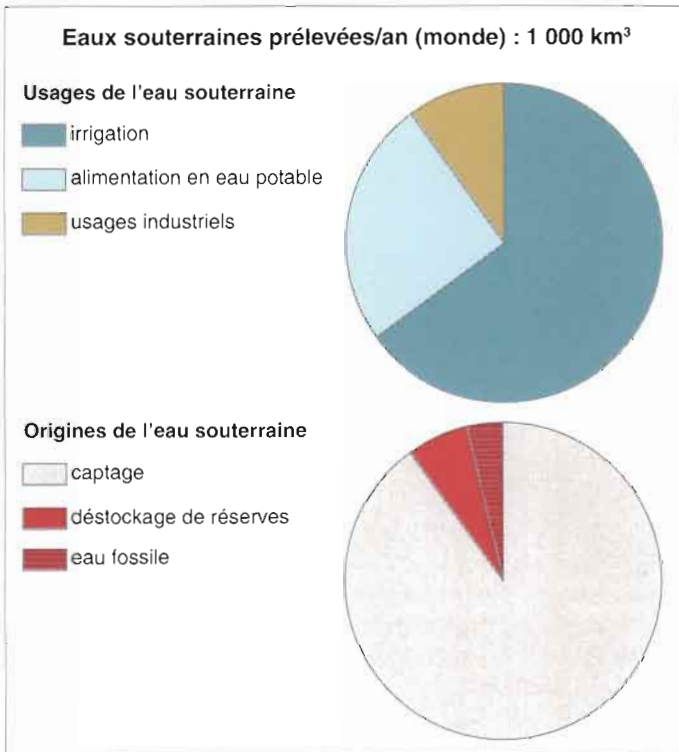
Les sources des statistiques nationales et internationales sur les prélèvements d'eau souterraine sont inégalement précises et fiables, selon les pays et les utilisations de l'eau. Seule une faible proportion en est contrôlée par des compteurs, même dans les pays développés, et la plupart des chiffres résultent d'estimations à partir d'indicateurs, comme les superficies irriguées par eau souterraine pour l'usage agricole.

L'objet même des chiffrages n'est pas toujours homogène. Par exemple, dans certains pays, on ne tient pas compte des prélèvements indirects d'eau de rivière à travers les aquifères des alluvions (l'eau qui coule sous le lit de la rivière). L'eau d'exhaure des mines rejetée en rivière est parfois comptée et parfois ignorée, ce qui rend difficiles les comparaisons.

Au début du xxi^e siècle, la quantité totale d'eau souterraine prélevée dans le monde chaque année s'élèverait à environ 1000 km^3 , dont les $2/3$ servent aux irrigations, $1/4$ à l'alimentation en eau potable des collectivités et $1/10^e$ aux usages industriels. Trois pays cumulent à eux seuls presque la moitié du total mondial : l'Inde, la Chine et les États-Unis.

Sur ces prélèvements annuels, la plus grande partie, probablement les $9/10^es$ sont des captages qui dérivent ou pompent une partie des écoulements souterrains naturels, tandis que $1/10^e$, soit environ 100 km^3 annuels, sont des extractions proprement dites au sens de déstockage des réserves, dont une trentaine de kilomètres cubes par an d'eau fossile (voir les graphiques ci-dessous).

On estime que, au cours du xx^e siècle, au moins 1000 km^3 d'eau (= 1000 milliards de mètres cubes) ont été soustraits aux réserves non renouvelables d'eaux souterraines continentales (eau fossile).



73 Où les réserves souterraines sont-elles trop massivement utilisées ?

S'agissant d'exploitation des réserves d'eau souterraine, on doit distinguer :

– l'exploitation des réserves d'eau fossile d'aquifères profonds, sans ressources renouvelables significatives (elles sont analogues à des gisements d'hydrocarbures ou de minerai) ;

De l'exploitation raisonnable à la rupture, au XX^e siècle

Au cours des âges, l'humanité a diversément exploité les eaux souterraines, en fonction de la grande variété de situation et d'accessibilité de ces eaux, de la structure des sous-sols, des climats et du rapport aux ressources en eau de surface. Jusqu'au XIX^e siècle, les besoins en eau sont demeurés mineurs et, même en zone aride, modestes et stables. Au cours du XX^e siècle, l'évolution des savoirs et des méthodes de prospection, comme des techniques d'accès et de prélèvement,

changent la donne et ont ouvert la voie à une exploitation intensive croissante des ressources en eau souterraine dans beaucoup de pays (Inde, États-Unis, Chine...).

À l'âge du bronze, les exploitations minières pour trouver des métaux ont probablement provoqué les premières extractions d'eau souterraine, par galerie puis par pompage d'exhaure. Il s'agissait d'évacuer des eaux souterraines qui gênaient l'extraction des minerais et non de répondre directement à des besoins en eau en surface.

L'exploitation gravitaire, élargissant les captages de sources par des galeries dites « mines d'eau », sans dépense d'énergie, s'est développée en Perse dès avant notre ère, et elle est encore pratiquée en Iran, bien que maintenant mineure. D'autres régions du monde ont connu la même histoire (voir question 58).

Aujourd'hui, les prélèvements actuels d'eau souterraine dans le monde varient, selon les pays, de quelques millions à près de 250 milliards de mètres cubes annuels, équivalant à une gamme de quelques mètres cubes par an à plus de 800 m³ par an et par tête, le record en Inde. Parmi les autres pays gros préleveurs car très dépourvus d'eau de surface : l'Arabie Saoudite, les Émirats Arabes Unis, la Libye. Ainsi, dans certains pays, les prélèvements en eau souterraine ne représentent qu'une petite proportion du total de ces ressources renouvelables naturelles, tandis que dans d'autres pays, la rupture d'équilibre est là, car l'exploitation a largement dépassé 100 %.

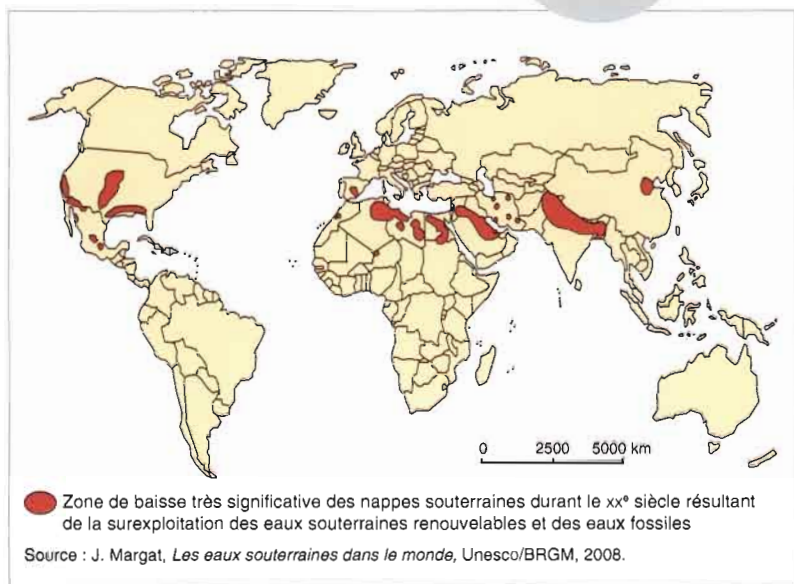
– de la surexploitation d'aquifères à ressources renouvelables qui provoque leur déstockage, c'est-à-dire la réduction tendancielle du volume d'eau dans le sous-sol.

Les pays qui exploitent le plus des eaux souterraines fossiles sont l'Arabie saoudite, la Libye et l'Algérie, tous familiers avec une économie extractiviste, qui cumulent 80 % du total mondial actuel d'exploitation d'eau souterraine estimé à 32 milliards de mètres cubes annuels. L'Australie a aussi beaucoup fait décliner le Great Artesian Basin avec l'exploitation de sa nappe d'eau fossile commencée au XIX^e siècle.

Les pays où la surexploitation d'aquifères à ressources renouvelables provoque un ample déstockage sont plus nombreux :

- l'Inde, surtout la région du Rajahstan, avec au moins 100 km³ par an,
- les États-Unis, principalement avec l'aquifère Ogallala dans les hautes plaines du Middle West et en Arizona, pour environ 36 km³ par an,
- la Chine, principalement dans la plaine du Nord-Est et quelques autres régions, pour 30 km³ par an,
- l'Iran, pour 16 km³ par an,
- le Mexique, pour au moins 14 km³ par an.

Principaux sites de surexploitation des nappes d'eau souterraine dans le monde.



74 L'exploitation des gaz de schiste nuit-elle aux nappes d'eau souterraines ?

Les gaz de schiste ont la même origine que le charbon et le pétrole : c'est de la matière organique enfouie, piégée et comprimée dans des roches mères. Sous l'effet de fortes pressions et de la chaleur, le pétrole et le gaz migrent vers des roches poreuses et perméables où ils forment des réservoirs immobiles. Cependant, dans certaines conditions d'imperméabilité de la roche mère, et à plus de 3 kilomètres de profondeur, les hydrocarbures restent piégés, en particulier dans les schistes bitumineux.

Pour les extraire, la technique utilisée consiste à établir un forage vertical pour atteindre la roche mère, à développer ensuite des galeries horizontales autour du point le plus profond atteint, à fracturer la roche en utilisant d'abord des explosifs ou en insufflant directement dans les vides créés de l'eau à très forte pression mélangée à des composants chimiques qui facilitent la mobilité des hydrocarbures et du gaz dans les fractures de la roche. Du sable est aussi injecté pour éviter que les fissures ne se referment. La composition des adjuvants chimiques est gardée secrète par les compagnies privées qui ont mis au point la filière d'extraction du gaz de schiste, mais on sait que certains composants sont très toxiques et génèrent un risque élevé de pollution des eaux souterraines.

En effet, chaque puits d'extraction du gaz de schiste nécessite plusieurs dizaines de milliers de mètres cubes d'eau envoyés à 3000 m de profondeur. Le gaz chassé de la roche remonte dans le tuyau de forage poussé par l'eau injectée. La plus grande partie de l'eau de traitement reste au fond, le reste remonte en surface et est stocké dans des réservoirs *ad hoc*, traité ou réemployé dans des puits de forage voisins.

Alors que ces ressources sont connues depuis très longtemps, elles n'ont intéressé les compagnies pétrolières et celles de l'industrie du gaz qu'à partir du moment où le prix des hydrocarbures conventionnels atteignait des niveaux élevés, dans les années 2000. L'extraction du gaz de schiste est devenue massive aux États-Unis et au Canada, dont les gouvernements ont favorisé l'exploration puis l'exploitation à grande échelle. Dans ces pays comme dans d'autres qui ont suivi ces orientations stratégiques en matière de ressources énergétiques

nationales, des scientifiques ont étudié les risques environnementaux induits par les pratiques industrielles.

Les risques de pollution de l'eau souterraine diffèrent selon les contextes d'exploitations, la géologie des lieux, la disposition des aquifères et les chemins empruntés par les industriels pour accéder aux ressources profondes. En surface, on retrouve les risques classiques des réservoirs contenant des eaux traitées pour être envoyées au fond du forage et des eaux récupérées nettement dégradées par leur passage dans le circuit de l'extraction. Des risques de fuites ne sont pas négligeables tout au long du forage entre la surface et le point le plus profond. En outre, une fois fracturée, la roche mère pourra ne plus retenir aucun fluide. Ceux-ci migreront vers le haut et viendront contaminer des eaux souterraines supérieures. Le risque est plus élevé dans les zones calcaires karstiques, où l'eau circule plus rapidement et peut ainsi faciliter le transit des produits toxiques en surface via les sources naturelles ou les captages installés par l'homme. Les forages eux-mêmes peuvent faciliter des connexions non prévues entre des aquifères distincts.

Ce sont les principales raisons qui, en 2011, ont amené des scientifiques des laboratoires de l'université de Montpellier II (Géosciences, Hydrosociences et l'Observatoire de recherche méditerranéen de l'environnement) à lancer des alertes afin de bien connaître les contextes et les problèmes générés par les premières autorisations d'exploration des gaz de schiste en France. Après quelque temps de réflexion, les permis ont été suspendus. L'exploration est contestée par certaines couches de la société, tandis que d'autres estiment que la connaissance des ressources ne peut pas être stoppée. Le risque environnemental est quand même avéré pour l'eau souterraine et, en France, le consensus politique reste, en 2014, d'attendre des éléments nouveaux pour relancer ou non la filière.

Ce qui distingue l'Europe de l'Amérique du Nord à ce sujet, c'est le contexte démographique et urbain très différent. En Europe, la plupart des sites qui seraient favorables sont aussi des sites extrêmement peuplés. Tous les dommages possibles auraient des conséquences humaines et sociales insupportables. Aux États-Unis et au Canada, la plupart des champs de gaz de schiste en exploitation sont situés dans des zones dépeuplées, loin des grandes villes et, du coup, les risques y semblent moins déterminants en cas d'accident industriel ou de migration d'eaux profondes polluées dans les aquifères.

75 À quelles menaces les eaux souterraines sont-elles vulnérables ?

Les activités humaines menacent les eaux souterraines sous deux aspects :

- les excès d'exploitation, dits « surexploitations », impactent le régime naturel des nappes souterraines, leur accessibilité, leur contribution aux eaux de surface régulières. De plus, l'urbanisation imperméabilise les sols, et des aménagements fluviaux (colmatage des berges) ou souterrains peuvent réduire l'alimentation des aquifères ;
- la seconde menace réside dans les diverses pollutions, directes ou induites, locales ou diffuses, accidentelles ou endémiques (y compris via la pollution d'eau de surface ou météorique, comme les pluies acides), et par les effets d'exploitations intensives attirant des eaux de mauvaise qualité (invasion d'eau de mer dans un aquifère littoral).

La pollution de l'eau sous les champs cultivés

Le niveau de pollution sous les champs dépend de plusieurs facteurs : manières de produire, aménagement des terres, caractéristiques des sols et de la circulation de l'eau. Le choix de conduite des cultures et de l'élevage par les agriculteurs est primordial.

Le recours élevé à des intrants et des produits de synthèse de l'industrie chimique met en péril à la fois le sol et le sous-sol, avec comme corollaire la pollution de l'eau souterraine. L'intensification du chargement animal et la mise en place d'unités de production hors-sol dans l'élevage porcin et les filières de volailles ont provoqué dans certaines régions des catastrophes environnementales. Les impacts se ressentent non seulement dans les systèmes d'eau potable locaux, mais aussi à distance.

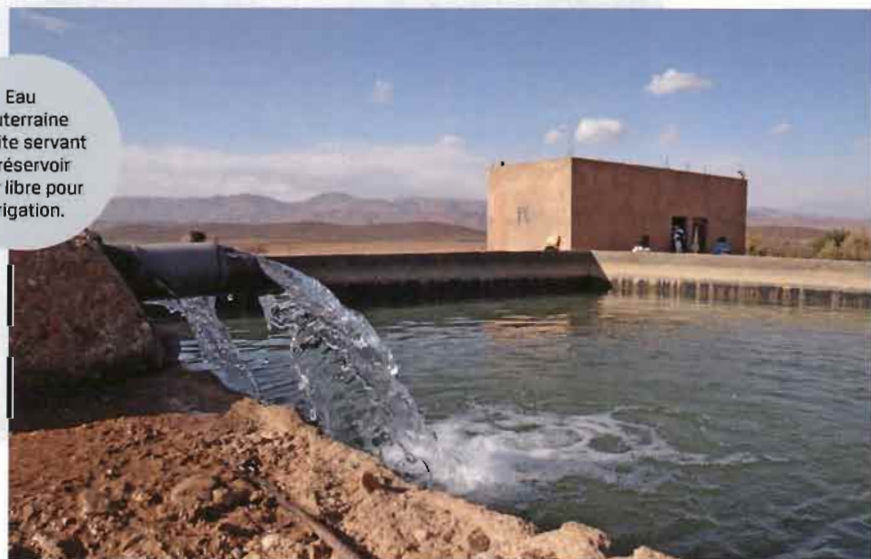
Si ces pratiques ont duré plusieurs dizaines d'années, l'accumulation des polluants est parfois irrémédiable. Il ne suffit pas de les interrompre une année pour revenir à un environnement exempt de molécules dangereuses pour la biosphère et pour la santé humaine. Même après des années de précaution et de pratiques vertueuses, le sous-sol et les eaux peuvent encore contenir des polluants dont la concentration ne diminue pas. Cependant, des expériences de pratiques agricoles extensives autour de captages d'eau souterraine servant à de grandes métropoles (Paris, Munich), ou liées aux bassins d'alimentation d'eaux minérales (Vittel) ont réussi : les agriculteurs sont tenus par contrat à respecter des chargements animaux limités et à garantir l'absence totale de recours aux produits chimiques. Là, l'eau sous les champs n'est pas polluée et les nappes ont retrouvé une qualité indéniable.

Aujourd'hui, dans les zones où les eaux souterraines sont la principale source d'approvisionnement pour les activités humaines (notamment les zones arides ou méditerranéennes), on a coutume d'opposer les usages agricoles aux usages urbains, les premiers étant considérés comme excessifs et polluants, les seconds comme essentiels à la vie et à l'économie. Or ces derniers sont souvent aussi polluants et parfois guère vertueux en termes d'économie d'eau. En réalité, les déséquilibres sont largement imputables aux concurrences, au sein de l'agriculture, entre les préleveurs historiques dont le comportement était compatible avec le renouvellement naturel de l'eau, et les préleveurs les plus récents, qui, en mobilisant des technologies et en recourant aux énergies fossiles, captent sans compter l'eau qu'ils se sont littéralement appropriée.

Pour le moment, la surexploitation des nappes d'eau souterraine ne concerne pas tant les zones les plus arides du monde, où il y a encore une attention aux intérêts collectifs et des modèles de régulation sociale des prélèvements, que les zones semi-arides comme le centre des États-Unis, où non seulement les nappes phréatiques sont très limitées et polluées, mais les nappes plus profondes, au renouvellement plus long, s'effondrent année après année. La situation est aussi critique en Inde, à la suite de l'équipement généralisé des puits en pompes électriques sans facturation des consommations électriques (ni de l'eau, d'ailleurs). Au Maroc, la course à l'enfoncement des pompes puis aux forages industriels a démarré sous le protectorat français et s'est accentuée par la suite. Les régions d'Agadir et de Marrakech ont déjà atteint un stade critique, avec comme conséquence immédiate le déséquilibre entre de grandes familles capables de suivre la course et de très nombreuses familles privées d'eau pour maintenir leur activité agricole et donc poussées à quitter les campagnes pour les bidonvilles des périphéries des grandes villes.

Des formes
nouvelles
d'agriculture
extractiviste

Eau
souterraine
extraite servant
de réservoir
à l'air libre pour
l'irrigation.



76 Comment protéger l'eau souterraine ?

On doit la protéger contre les impacts d'activités humaines qui dénaturent son régime ou détériorent ses qualités (surexploitation, appauvrissement, pollution), tout en tenant compte de son degré de vulnérabilité et de la valeur de sa conservation. D'abord en imposant des restrictions d'occupation du sol (imperméabilisation, endiguement de cours d'eau) ou du sous-sol (cloisonnement). Et surtout en limitant les exploitations ou en compensant leurs excès par l'alimentation artificielle. Puis en arrêtant les pollutions de toutes sortes, au moyen de mesures coercitives : excès d'utilisation de fertilisants, de désherbants ou de pesticides par l'agriculture, rejets d'eaux usées, urbaines ou industrielles, ou lessivage de dépôts de déchets mal isolés. Tout particulièrement en instituant des périmètres de protection des sites de prélèvement pour la fourniture d'eau potable.

Ces orientations environnementales demeurent toutefois encore trop souvent plus intentionnelles que réelles, car les mesures prises contrarient d'autres intérêts et priorités...

À quoi servent les zones tampons ?

À l'échelle locale, les bandes enherbées placées à certaines distances les unes des autres sont de véritables zones tampons pour ralentir l'eau de surface et contribuer à l'infiltration lors d'épisodes pluvieux assez forts. Certaines sociétés rurales sont allées plus loin encore, en réalisant des maillages enherbés complets autour des champs cultivés, par exemple les paysans de l'Imbabura, au nord de l'Équateur.

Grandes ou petites, les zones tampons favorisent généralement l'infiltration, donc la recharge de nappes. En zone aride, des diguettes semi-filtrantes sont établies sur le lit des rivières intermittentes et les versants à cette seule fin : obliger l'écoulement rapide et fugace à ralentir pour que l'eau progresse plus verticalement qu'horizontalement.

En riziculture, la succession des parcelles inondées, alimentées les unes par les autres, constitue un système aux bénéfices similaires, à la fois pour la circulation des eaux de surface et pour les mécanismes biologiques de destruction des polluants. Ces principes existent aussi dans de nombreuses stations d'assainissement de l'eau urbaine, où des végétaux aquatiques placés dans des zones lagunaires tampons contribuent à purifier les eaux usées.

Le lagunage consiste à faire passer l'eau dans différents bassins de décantation et de purification pour obtenir en fin de parcours une eau de bien meilleure qualité. Les polluants sont alors plus facilement décomposés par les micro-organismes et l'action du soleil.

77 Y a-t-il un marché des eaux souterraines ?

Même si les États ont déclaré dans leur Constitution ou leurs lois que les eaux relevaient du domaine national, la gestion des eaux douces, superficielles comme souterraines, met en scène des institutions diverses : administrations, collectivités et entreprises. D'une part, les eaux souterraines sont les plus sollicitées pour établir des réseaux d'eau potable. D'autre part, pour des raisons historiques et politiques, les autorités locales décident de déléguer le service de l'eau à des entreprises privées pour la prélever, la pomper, la stocker, la traiter et la distribuer. C'est pourquoi les eaux souterraines font l'objet de concurrence entre entreprises privées au moment de la négociation des contrats : il s'agit d'un marché des offres de services. Mais ensuite, les règles du jeu sont fixées pour une longue durée, sans qu'il y ait véritablement marché et concurrence. En fait, le nombre de ces sociétés s'est considérablement réduit et il n'y a pas assez de concurrence sur les délégations de services publics.

Pour exploiter des eaux minérales prélevées dans des sources, les industriels disposent de droits exclusifs d'extraction, fixés par les pouvoirs publics. Il n'y a donc pas de marché de droits concurrents pour une même source souterraine. En revanche, les eaux minérales souterraines mises en bouteilles se trouvent bien en concurrence dans le commerce, où leur succès repose essentiellement sur le manque de confiance de la population dans la qualité des eaux du robinet, fournies à un prix cinq cents fois moins élevé.

Le recours à l'eau souterraine pour des usages agricoles peut prendre parfois des allures de marché local de l'eau. Dans de nombreux pays, celui qui a la capacité de pomper l'eau peut en user comme il le souhaite, même si son captage est illicite (ce qui est le cas le plus fréquent). En général, il s'agit de petits services dans un réseau de voisinage, qui échappent ainsi à la notion de marché. On y trouve des tarifs souvent très bas, couvrant des frais de fonctionnement (l'énergie nécessaire), mais pas l'intégralité du coût de l'installation. De fait, des échanges de services existent sans passer par le monétaire, et la pratique du don et du contre-don a lieu dans de nombreuses sociétés rurales oasiennes.

Un bouleversement consécutif à la surexploitation

Au sud-ouest de l'Espagne, dans la vallée du Vinalopo, la surexploitation de la nappe conduit à de nouveaux comportements collectifs et individuels. À force de soutirer toujours plus d'eau dans la partie médiane de la vallée, le niveau général de la nappe à l'amont de la vallée baisse aussi, d'autant plus que certains groupes y prélèvent directement leur eau, tandis que les autres accentuent le prélèvement sur la nappe médiane. Finalement, l'impact de ces pratiques a conduit à l'inversion partielle du cours d'eau supérieur. Les nappes n'alimentent plus la rivière d'amont vers l'aval. L'eau superficielle ne rejoint plus l'aval car l'eau de la rivière en amont s'infiltre directement et alimente les nappes surbaissées du haut bassin. Il y a eu une sorte de fracture hydrologique entre les composantes hydrographiques et les nappes. Continuité cassée, crise assurée.

Dans ce contexte, les anciennes institutions d'irrigants (*comunidades de regantes*), en butte à une crise de surexploitation des eaux de surface, ont donc extrait les eaux souterraines qu'elles pouvaient s'approprier, sans maintenir la cohésion territoriale et sociale du système ancien. Dans la vallée du Vinalopo où l'eau souterraine est extraite et vendue selon des principes de marché, deux modèles contradictoires voisinent. À Novelda, un ancien réseau gravitaire alimenté par une prise d'eau sur le río Vinalopo a vu ses ressources diminuer et l'eau de surface se dégrader. Pour maintenir l'activité de producteurs de raisin de table de grande qualité, la communauté d'irrigants est allée chercher de l'eau souterraine à plus de 50 kilomètres en amont, qu'elle achemine avec un tuyau jusqu'au périmètre irrigué. L'eau est vendue aux enchères publiques dans un espace assez vaste pour accueillir des centaines de petits producteurs. Un juge de l'eau, assimilable à un commissaire-priseur, annonce pour chaque branche de distribution du canal un tarif de l'eau à prendre. Les enchères sont silencieuses et descendantes : au départ, le prix est fixé haut, puis le juge annonce des tarifs dégressifs jusqu'à ce qu'un producteur se lève en silence.

Enchères sur l'eau souterraine distribuée dans le territoire irrigué de Novelda (Espagne).



Règle de base des enchères à Novelda : il est interdit de converser pendant les enchères, sous peine d'expulsion.

Cette pratique étonnante est très ancienne, elle fonctionnait déjà il y a au moins trois siècles avec le réseau superficiel. Le silence est requis pour éviter que les personnes les plus influentes, les « plus forts en gueule », s'octroient les droits d'eau en criant plus fort que les autres. Les tarifs finaux sont en fait relativement bas, car le but n'est pas de maximiser le profit du tribunal de ventes mais d'orchestrer une sorte de théâtre de l'eau silencieuse. Les protagonistes attendent tous que le tarif soit très bas pour se lever.

À quelques kilomètres de Novelda, le village d'Aspe a connu la même crise, mais là, la communauté d'irrigants-viticulteurs a opté pour rompre avec l'ancien système et délégué le service de l'eau souterraine à une entreprise privée. Le prix de l'eau est fixé par l'entreprise privée, qui organise sur place des forages à plus de 400 mètres de profondeur. Globalement, ce marché fonctionne à un prix de l'eau deux fois plus élevé qu'à Aspe.

En réalité, la notion de marché de l'eau souterraine n'est pas pertinente. Mais l'idée d'un marché de l'eau plus large que l'échelon local a ses adeptes et concerne à la fois les eaux de surface et les eaux souterraines. La mondialisation conduit certaines entreprises à imaginer que les questions de raréfaction de l'eau en général déboucheront tôt ou tard sur un marché standard de l'eau, national ou transnational, à l'image des bourses mondiales qui régulent plus moins bien les ressources naturelles minières ou agricoles. Actuellement, l'exemple le plus frappant est l'action menée au Canada par la firme multinationale Nestlé, qui propose de mettre fin à la concurrence entre l'extraction du gaz de schiste et l'agriculture en Alberta par un marché de l'eau généralisé quotidien dont l'entreprise se ferait le prestataire central.

78 Les eaux souterraines sont-elles éternelles ?

Sans influence humaine sur l'alimentation et l'écoulement des eaux souterraines, le risque d'épuisement d'une nappe souterraine, au sens de dénoyage de l'aquifère, ou plus précisément d'interruption d'écoulement de son ou ses émergences, est très rare. Il pourrait survenir seulement pour un aquifère de faible capacité – à la réserve très limitée – en région sous climat aride, après plusieurs années consécutives sans précipitations.

Dans les zones sous climat tempéré ou tropical, la plupart des sources sont intarissables, à l'exception des sources temporaires, celles qui naissent d'un débordement de trop-plein d'aquifères plus ou moins perchés, en milieu montagneux.

Dans le cas particulier des aquifères karstiques, il est déjà survenu que des sources cessent de couler pendant plusieurs jours, des mois ou même des années, probablement à la suite de ruptures ou d'obturations naturelles dans le réseau souterrain. Ce phénomène spectaculaire et très rare est consigné dans des chroniques. Par exemple, la Foux de la Vis, dans l'Hérault, a plusieurs fois cessé de couler : en 1779 pendant 8 jours, en 1890 durant 24 heures, en 1927 pendant 8 heures et le 10 août 1961 pendant 5 heures.

Certaines nappes sont mises en danger par l'importance du puisage. C'est moins le nombre de puits que l'addition des quantités d'eau puisée qui, si elle excède le débit naturel d'une nappe souterraine, à la longue, peut épuiser la réserve de l'aquifère et tarir les captages. Mais la multiplication des puits exploitant une même nappe favorise évidemment sa surexploitation.

Il y a trop de puits, mais surtout trop de pompes en fonctionnement dans les puits et les forages, ou trop de forages à proximité des nappes drainées par des galeries.

Dans l'Hérault, la source du Lez ne donne plus naturellement de l'eau pendant les mois d'été, du fait de l'exploitation actuelle du réservoir karstique souterrain : il sert à approvisionner le réseau d'eau potable de l'agglomération de Montpellier, situé à une douzaine de kilomètres en aval. Mais, par obligation réglementaire et souci de maintien d'un débit minimal dans le fleuve qui traverse la ville, le pompage souterrain renvoie un débit minimal de 180 l/s à l'endroit de la source naturelle, afin de maintenir une continuité hydrique et écologique. Malgré cette mesure, il n'est pas toujours facile de réaliser entièrement cet impératif, et la ville achète de l'eau du Rhône à la Compagnie nationale d'aménagement du bas Rhône-Languedoc pour assurer un écoulement minimal dans la partie urbaine et aval du Lez. Une étude du BRGM* indiquait en 2012 que le réservoir souterrain du Lez pourrait être exploité différemment en prélevant de l'eau une dizaine de mètres plus bas, et fournirait ainsi à la fois l'eau nécessaire à l'agglomération et un écoulement permanent plus important depuis la source du Lez.

* Projet multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez - simulations numériques de différents scénarios de changements globaux. Rapport RP-61050-FR, BRGM, 2012, 235 p.

Un potentiel
d'utilisation sous
condition

79 Et s'il n'y avait plus du tout d'eau dans le sous-sol ?

Dans certaines régions du monde, le risque de sous-sol sans eau existe lorsque les aquifères sont hyperexploités, par exemple deux fois plus vite que le rechargement naturel. Aux États-Unis, l'un des plus grands aquifères au monde, la nappe d'Ogallala, qui s'étend sur huit États du centre du pays (Texas, Nouveau Mexique, Oklahoma, Kansas, Colorado, Nebraska, Wyoming et Dakota du Sud), est en passe de disparaître d'ici trente ans. En surface, cet immense territoire ressemble actuellement, vu d'avion, à une mosaïque formée de milliers de cercles d'une centaine d'hectares, chaque cercle étant déterminé par un système d'irrigation à pivot central et une rampe tournante. Toute l'eau utilisée est prise dans la nappe commune à tous les États, sans discernement, chaque préleveur agissant pour soi. D'une certaine manière, la zone irriguée à partir de la nappe d'Ogallala indique les limites de l'étendue de cette nappe. Inéluctablement, la nappe baisse de près d'un mètre par an.

Malheureusement, ce phénomène se généralise. Les nappes marocaines du Souss ou de Marrakech (Maroc)

Irrigation
par rampe-
pivot
en Égypte.



vivent une situation similaire. La nappe baisse, les utilisateurs les plus riches réinvestissent dans des forages plus profonds, avec des machines plus puissantes. La compétition exclut une partie des utilisateurs les plus faibles sur le plan économique. Mais les plus riches en profitent pour étendre leurs plantations ou leurs grandes cultures. À ce rythme, la couche d'eau qui restera sera à peine de quelques mètres au-dessus du plancher imperméable qui retient la nappe, dans certaines poches, et le reste sera abandonné. D'ailleurs, de grandes entreprises extractivistes de l'eau cherchent aujourd'hui de nouveaux terrains, de nouvelles nappes à exploiter en prévision de l'absence d'eau dans le sous-sol des propriétés qu'elles exploitent dans le Souss.

À l'ouest du delta du Nil, dans le désert égyptien, des investisseurs captent des eaux souterraines profondes non renouvelables pour arroser des champs circulaires de plusieurs dizaines d'hectares chacun.

80 La ville n'assèche-t-elle pas son sous-sol ?

L'urbanisation a plusieurs effets contraires sur l'eau du sous-sol, lorsque celui-ci est formé de terrains perméables et contient une nappe phréatique :

- les constructions et les rues bitumées imperméabilisent le sol, ce qui réduit l'infiltration des eaux pluviales ;
- l'occupation du sous-sol (caves profondes, parkings, voies souterraines de métro) nécessite souvent un dénoyage qui abaisse artificiellement la nappe phréatique ;
- le recours à la nappe est encouragé pour des activités qui n'ont pas accès aux réseaux d'eau collectifs ;
- le réseau de distribution d'eau potable a des fuites (souvent de 30 à 50 %) qui, au contraire, suralimentent la nappe et font relever son niveau ;
- les conduits d'évacuation des eaux pluviales, dites « eaux blanches », à partir des bouches d'égout ou des « bassins d'orage », peuvent aussi avoir des fuites qui s'infiltrent (et contribuent à des pollutions).

Deux exemples parmi d'autres montrent que le bilan des apports et des prélèvements n'est pas toujours équilibré. En évacuant les eaux du lac qui l'entourait mais aussi en drainant

la nappe souterraine qui persistait autour et dans la ville, Mexico a asséché drastiquement sa nappe phréatique, et le centre-ville s'est enfoncé de 10 m en quatre siècles, avec des conséquences urbaines terribles de délabrement des édifices anciens. La cathédrale est soumise à différentes réparations pour corriger les effets de l'enfoncement, mais de très nombreux immeubles sont dans un état critique.

Le centre-ville de Montpellier connaît une évolution différente. Pendant neuf siècles, la ville et ses environs exploitaient, comme unique source en eau, la nappe phréatique entretenue par les orages cévenols et les crues du Lez et du Merdanson. La nappe était stable, assez profonde (40 m en ville) et son état était très préoccupant : au début du xx^e siècle, l'eau était polluée par la longue absence de tout réseau d'assainissement et par des incidents sur les centaines de puits existant à l'intérieur de la ville. Aujourd'hui, le système d'assainissement éloigne la pollution vers la station de traitement, puis vers l'émissaire en mer. Le niveau de la nappe semble toujours stable malgré la fin des inondations (par endiguement et bétonnage, les eaux de crue filent à la mer). Mais l'eau reste sous la ville avec une qualité d'eau presque pure : ce sont les fuites du réseau d'eau potable qui alimente en partie la nappe phréatique.

81 Qui irrigue ses champs avec de l'eau souterraine ?

Les très nombreux cultivateurs des régions sous climat aride ou méditerranéen le font, car les précipitations sont insuffisantes ou trop irrégulières pour arroser les cultures à la hauteur de leurs besoins, et ils ne disposent pas d'eau de surface ni d'eau de source pour l'irrigation, tandis que de l'eau souterraine est accessible localement et exploitable individuellement. Cette pratique est très ancienne dans certaines oasis d'Afrique du Nord ou du Moyen-Orient, ainsi qu'en Chine, où des procédés de puisage de l'eau souterraine originaux ont été inventés dès l'Antiquité. Ces cultivateurs se comptent à présent par millions dans le monde, particulièrement en Asie, Inde et Chine, où généralement l'énergie nécessaire au pompage (électricité ou fuel) est subventionnée par l'État, voire gratuite.

On estime que près de 70 millions d'hectares sont actuellement irrigués par eau souterraine dans le monde, utilisant



Puits dans la nappe phréatique exploitée par de petits producteurs, près de Ouarzazate (Maroc).

666 milliards de mètres cubes d'eau par an en 2010, presque entièrement par pompage. Cela représente un quart des surfaces irriguées totales, dont les trois quarts sont en Asie et un cinquième aux États-Unis.

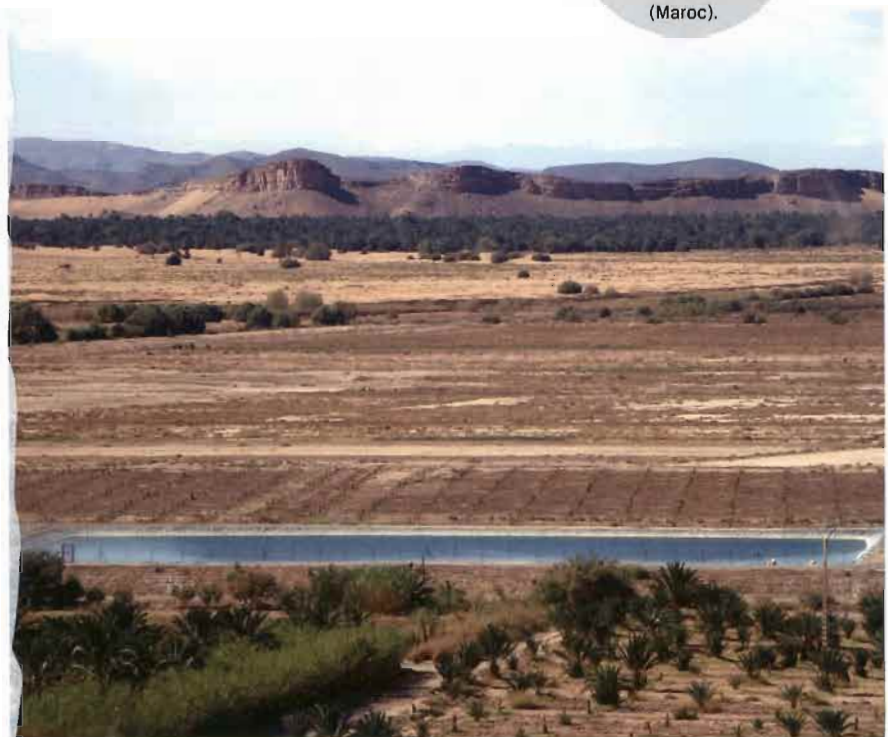
Il est généralement admis que l'irrigation par eau souterraine utilise l'eau de manière plus économe et plus efficace que l'irrigation par eau de surface, dans la mesure où elle recourt à des techniques d'arrosage localisé en aspersion ou au goutte-à-goutte. Cependant, des études de terrain commencent à montrer que l'efficacité des nouvelles techniques d'arrosage n'est pas aussi élevée qu'en situation de laboratoire où tous les paramètres sont contrôlés. Parmi les facteurs qui modifient les performances dans les champs, on peut citer les fuites d'eau des tuyaux sous la terre, qui ne sont pas négligeables. Le nombre de goutteurs est supérieur à celui prévu, les goutteurs en mauvais état délivrent plus d'eau que prévu, et le temps d'arrosage est allongé au-delà du temps de référence préconisé. Par ailleurs, l'espérance d'économie d'eau a incité les agriculteurs à accroître la superficie mise en culture quand ils en avaient la possibilité. Ainsi, les utilisations d'eau souterraine sont aussi la première cause des surexploitations de la ressource dans les pays où elles se sont développées.

Même dans un pays sous climat tempéré comme la France, on utilise souvent l'eau souterraine, proche et disponible

pour l'irrigation d'appoint, qui améliore la sécurité de la production agricole. Par exemple, dans la plaine de Beauce, 200 à 300 millions de mètres cubes d'eau souterraine, suivant les années, sont pompés par plusieurs milliers de forages pour l'irrigation. Après une période de plus de vingt ans où chaque grand céréalier investissait comme bon lui semblait dans la course aux arrosages à partir de la nappe, advint, à la fin des années 1990, une période de contestation sur l'ampleur de ces prélèvements, portée d'une part par des associations environnementalistes qui dénonçaient l'assèchement des rivières et par l'Agence de l'eau et l'État, qui voyaient là un exemple de difficile application de la loi française sur l'eau de 1992.

Dans les années 2000, les agriculteurs ont été incités à équiper leur forage d'instruments de mesure des prélèvements d'eau dans la nappe et à fédérer leur demande en eau globale en fixant des règles d'exploitation

Vaste réservoir d'un investisseur, avec alimentation par forages dans la nappe, en aval des galeries drainantes de l'oasis de Bouia (Maroc).



raisonnable, afin d'éviter des mesures préfectorales d'interdiction d'arrosage en période critique. Trouver un compromis n'est pas évident, d'autant que les politiques publiques se contredisent lorsque, d'un côté, elles visent à diminuer les prélèvements souterrains et à assurer l'écoulement minimal d'eau en rivière, tandis que de l'autre, des mesures incitatives pour développer l'arrosage se poursuivent. Dans ces confrontations, la recherche d'une conciliation entre intérêts divergents vise à instituer des contrats de nappe. La maîtrise de la gestion de l'eau souterraine est toujours difficile du fait du manque d'informations fiables, de délimitations sûres, de connaissances des pratiques des uns et des autres, de confiance entre les parties prenantes.

Pour sortir de crises incessantes, aggravées à chaque nouvelle sécheresse, il faudrait considérer l'eau souterraine comme un bien commun dont l'accès est défini par des règles établies entre tous les auteurs de prélèvements, mais aussi avec tous les bénéficiaires de l'eau milieu de vie, représentés par des associations citoyennes sur l'environnement, des représentants des activités économiques et des administrations territoriales relayant les politiques publiques nationales.

82 Pourquoi ces remontées de sels dans les champs ?

Irrigation et drainage vont ensemble. On parle de gestion sociale de l'eau mais on pourrait aussi parler de gestion sociale des sels en irrigation, car leur dispersion dépend de la coordination entre les acteurs, de la gestion des eaux abondantes et de l'entretien des drains. Si on néglige un de ces aspects, l'évaporation et la transpiration des couverts végétaux ainsi que la remontée des sels par capillarité provoquent la concentration des sels dans la terre arable.

Chaque fois qu'un terroir irrigué organisé historiquement selon des principes de solidarité et de continuité des usages évolue vers des pratiques individualistes, opposées à des règles communes, les disjonctions entre les périmètres d'arrosage et les périmètres de drainage entraînent une conséquence inéluctable : les sels ne sont plus mobilisés par les arrosages de l'ensemble des terrains, ils ne circulent plus. Du coup, ils se concentrent dans les champs qui évaporent le plus d'eau.



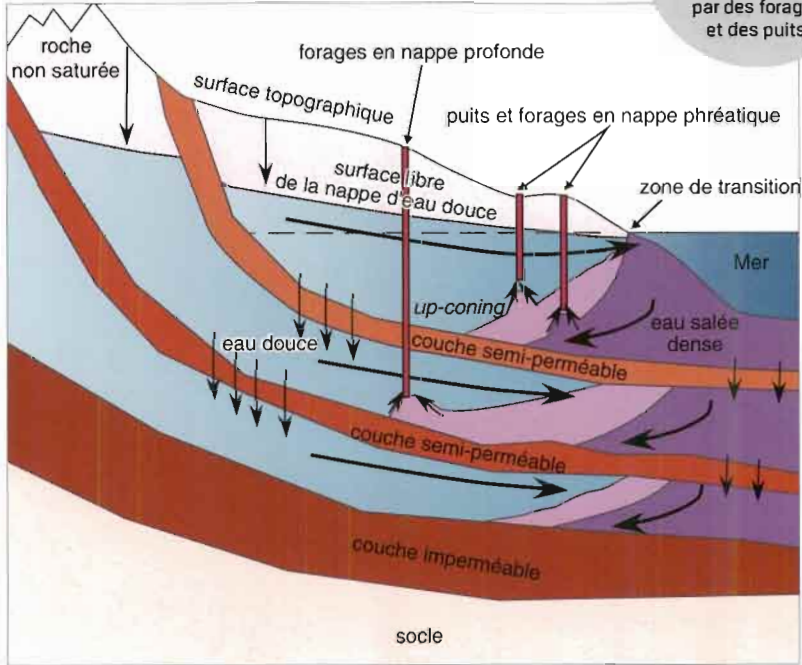
83 La mer peut-elle envahir des nappes d'eau souterraines ?

Inflorescences salines dans l'oasis de Skoura (Maroc).

Dans les conditions naturelles, l'eau de mer pénètre jusqu'à une certaine distance de la côte dans tout sous-sol de zone littorale formé de roches perméables, donc aquifères. Elle forme un biseau d'eau salée sous la nappe d'eau douce moins dense, d'autant plus loin que la pente de celle-ci est faible et que son niveau est peu supérieur à celui de la mer, notamment dans une plaine côtière ou un delta. Ce n'est pas une « invasion » d'eau de mer au sens d'un déplacement, mais une présence statique, qui peut cependant varier en fonction d'une marée. Par contre, l'exploitation de la nappe d'eau douce littorale, qui fait baisser son niveau, accentue la pénétration d'eau de mer et peut provoquer une invasion. En effet, l'interface entre l'eau

douce et l'eau salée se déplace alors, notamment à la verticale des puits de pompage. Cette invasion est la principale conséquence des exploitations intensives des nappes souterraines littorales, très fréquentes dans de nombreux pays à façade maritime.

Principes d'équilibre entre nappes d'eau douce et nappes d'eau salée dans un système multicouche exploité par des forages et des puits.



84 Le réchauffement climatique va-t-il assécher le sol et le sous-sol ?

Dans toutes les parties du monde où le réchauffement climatique a pour conséquences à la fois une diminution des précipitations et une augmentation de l'évapotranspiration, l'impact sur les eaux souterraines est certain, mais à des degrés variables selon les régions affectées. La probabilité de ce phénomène est encore difficile à chiffrer.

Les déserts les plus arides le resteront, même avec le changement climatique annoncé. Une réduction de pluviométrie là où celle-ci est déjà très insuffisante se percevra peu. En revanche, des régions périphériques aux zones les plus arides pourraient

subir le double impact du relèvement des températures et de la réduction des précipitations.

Mais ce scénario n'est pas inéluctable. D'abord, il est possible que l'élévation de température accélère le grand cycle de l'eau et, par conséquent, provoque un accroissement des pluies sous forme d'orages plus intenses, tels que le Maroc en a connus dans les années 2005-2010. Ensuite, selon les lieux et les capacités des sociétés humaines, la gestion des eaux souterraines peut compenser les manques, à condition de ne pas surexploiter ces ressources. Dans certaines situations, l'accentuation de la sécheresse ne provient pas principalement du changement climatique mais de l'excès de prélèvement d'eau souterraine non compensé par les apports naturels.

En France, des sécheresses plus fortes et plus longues qu'à présent, notamment estivales, sont prévisibles pour la fin du **xxi^e** siècle, et elles devraient affecter particulièrement les sols les plus humides actuellement (Nord et Nord-Est).

85 À quelles conditions les galeries drainantes resteront-elles en activité ?

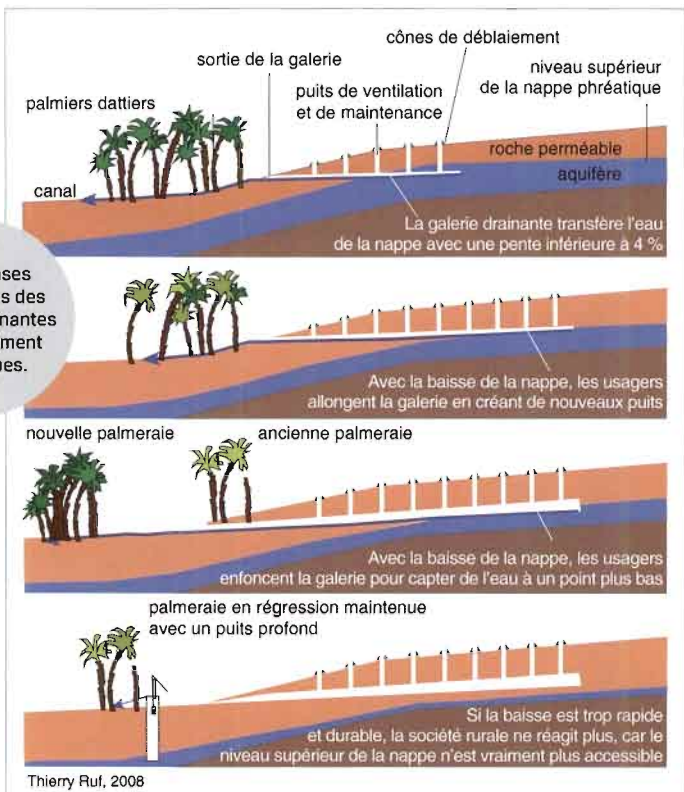
Les galeries drainantes sont partout en danger de disparaître sous l'effet de l'exploitation irraisonnée de la nappe par les forages. La première condition pour les maintenir en activité est de réaliser un moratoire total sur les nouveaux projets de forages, de recenser ceux qui existent et de mettre des limites d'utilisation négociées avec l'ensemble des parties prenantes cogestionnaires de la nappe. Une des formes possibles d'organisation serait de créer une autorité locale de l'eau, désignée par les usagers de la nappe réunis en assemblée générale et soutenue par les pouvoirs publics.

La deuxième condition est de revaloriser les dimensions culturelles et historiques, d'intégrer ces galeries dans la délimitation des zones de captage protégées et des zones de transfert par lesquelles passe l'eau vers les zones d'usage (comme on le fait déjà pour protéger des captages d'eau potable pour les villes, voir encadré de la question 75). L'initiative doit partir du terrain et non d'un bureau administratif.

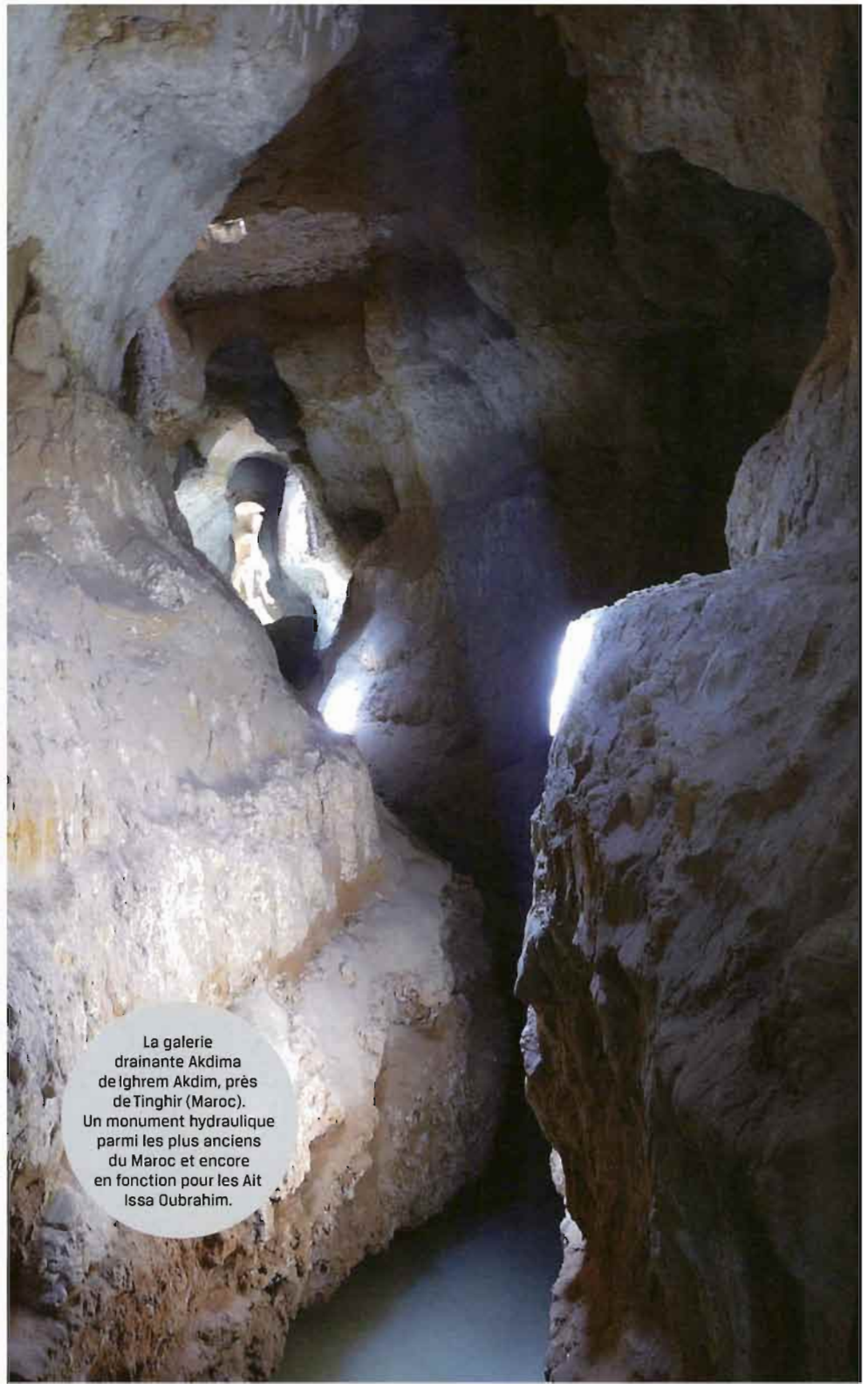
La troisième condition est de changer les mentalités des ingénieurs et des administrateurs. La galerie drainante a trop longtemps été perçue comme un ouvrage périmé, sans intérêt

technique et sans avenir. Les milliers de galeries drainantes encore vives et utiles aux sociétés qui les utilisent montrent que ce sont des dispositifs ingénieux, fonctionnant dans la très longue durée. Leur réalisation et leur maintenance sont des prouesses techniques. Cependant, la modernisation des chantiers avec des outils plus sécurisés et plus efficaces est nécessaire pour que les jeunes générations puissent investir autant mais dans de meilleures conditions de travail.

Les galeries drainantes, comme d'ailleurs les canaux de montagne, apportent au territoire et à la société locale des identités collectives, des rythmes dans la vie sociale, une inscription dans l'histoire des lieux. La galerie est reçue des générations passées et doit être transmise aux générations futures.



Les réponses des usagers des galeries drainantes à l'abaissement des nappes.



La galerie drainante Akdima de Ighrem Akdim, près de Tinghir (Maroc). Un monument hydraulique parmi les plus anciens du Maroc et encore en fonction pour les Ait Issa Oubrahim.

86 Le goutte-à-goutte sauvera-t-il les eaux souterraines ?

Le goutte-à-goutte est une technique mise au point en Israël dans les années 1960 qui consiste à distribuer aux plantes de l'eau en localisant l'arrosage à leur pied, aux moyens de goutteurs disposés sur des tuyaux en plastique. La technique est très utile pour conquérir de nouvelles terres, étendre l'arrosage en dehors de toute considération géomorphologique. Pour que cela fonctionne, il suffit de prélever l'eau et de la mettre sous pression avec des pompes diesel ou électriques. Dans toutes les régions irriguées du monde, les pouvoirs publics incitent à abandonner les réseaux gravitaires (qui en général n'utilisent pas d'énergie fossile) pour des réseaux sous pression, tantôt avec des asperseurs, tantôt avec du goutte-à-goutte. Cette dernière technique impose de disposer en amont d'eau avec très peu de matières en suspension, faute de voir les goutteurs se boucher et l'installation perdre tout intérêt. Les eaux souterraines sont de ce point de vue bien plus intéressantes que les eaux de surface. L'exigence d'une très bonne filtration est moindre.

Ce système sous pression est réputé économiser de l'eau et, par conséquent, limiter les prélèvements d'eau en milieu naturel et en particulier dans la nappe. Mais plusieurs facteurs aboutissent au résultat inverse. Premier facteur et le plus important : l'encouragement à conquérir de nouveaux espaces à l'arrosage, puisque la technique est promue comme économe (on annonce souvent - 50 % d'eau consommée). Cette technique essentiellement individuelle incite ceux qui peuvent l'adopter à cultiver deux fois plus qu'avant. Et, comme elle entraîne une détérioration du lien social, le forage se substituant à l'ouvrage géré en commun, les galeries drainantes ne reçoivent plus autant d'attention, et la participation aux travaux d'entretien devient problématique.

Le deuxième facteur est lié aux pratiques des irrigants. En réalité, l'économie attendue de la moitié du volume prélevé ne se révèle pas exacte car c'est une donnée de laboratoire, pas de terrain. Les agriculteurs prennent une marge de manœuvre sur les doses et en rajoutent (soit en augmentant le nombre de goutteurs par plante, soit en allongeant la durée d'irrigation). L'installation vieillit et des fuites apparaissent, des goutteurs



Mise en place de goutte-à-goutte dans une ancienne palmeraie (Tafilalet, Maroc).

cassent, et la consommation peut croître d'une saison à une autre.

Enfin, en milieu oasien, le lessivage des sels accumulés exigerait de maintenir un arrosage gravitaire annuel (voir question 82). Or, dans les anciennes oasis, le passage à des systèmes enterrés de tuyaux d'eau sous pression s'est parfois fait en abandonnant totalement l'ancien réseau de canaux et rigoles de surface. On ne peut plus irriguer par gravité l'ensemble du terroir oasien. Dans les nouveaux secteurs agricoles gagnés en périphérie de l'oasis ancienne, c'est pratiquement impossible, faute d'installations pensées pour cela.

Pour résumer, économiseur d'eau d'un côté (mais pas toujours), consommateur d'énergie (et de polluants plastiques), le goutte-à-goutte a aussi des conséquences sociales et contribue à remodeler les espaces irrigués, parfois à agrandir les zones cultivées, et donc à surexploiter des ressources déjà diminuées.

Irrigation par goutteur dans la province de la Libération, au sud-ouest d'Alexandrie (Égypte).

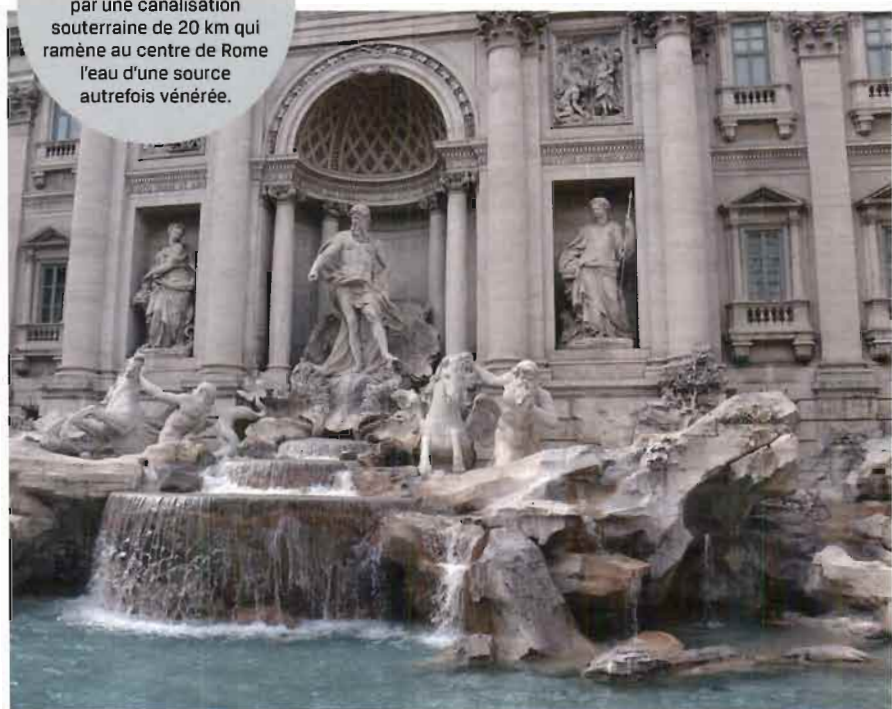


87 L'eau souterraine inspire-t-elle l'art ?

Mystérieuse apparition au jour, parfois mythique et vénérée, la source a souvent été personnifiée par une nymphe, a inspiré de nombreux artistes, surtout des peintres, comme Ingres. Mais elle a aussi été peinte en tant que composante vivifiante d'un paysage (*La Source de la Loue* par Courbet, 1864), sans oublier la scène légendaire où Moïse frappe le rocher pour en faire jaillir l'eau, d'origine évidemment souterraine (tableau de Poussin, vers 1649).

Le puits, instrument d'accès à l'eau souterraine, et la scène de puisage sont également un sujet traité sous de multiples techniques (gravure, peinture, mosaïque, sculptures), partout dans le monde. À commencer par l'art préhistorique rupestre, en passant par les pyxis scythes et jusqu'aux vases grecs, de la numismatique (voir la pièce de monnaie de 10 francs CFA en 1982) à l'art naïf contemporain, sans compter de nombreuses œuvres d'art populaires anonymes d'Afrique et d'Asie.

La fontaine de Trevi, à Rome. Depuis le XVIII^e siècle, elle est alimentée directement par une canalisation souterraine de 20 km qui ramène au centre de Rome l'eau d'une source autrefois vénérée.





La source
du château de Jacou
(Hérault), ornée
d'une mosaïque
de coquillages (XVIII^e siècle).
L'une des rares sources
françaises aménagées
en grotte.

Des puits sont présents dans des tableaux de Dürer (*La Nativité*, 1504), Botticelli (*La Fuite de Moïse*, à la chapelle Sixtine, vers 1482), Signac (*Femmes au puits*), et même une illustration de Saint-Exupéry dans *Le Petit Prince*...

88 Les eaux souterraines sont-elles sujettes à des légendes ?

Dans la mythologie grecque, le monde souterrain, domaine d'Hadès et séjour des morts, possède des cours d'eau comme le monde visible. Ce sont les fleuves des enfers aux fonctions symboliques : le Styx, l'Achéron (avec son affluent le Cocyte) et le Léthé, nés eux-mêmes de sources occultes (Mnémosyne source de mémoire et Léthé source d'oubli), puis qui vont s'abîmer dans le Tartare...

Le site
sacré
de Tison, proche
de l'ancienne
capitale Inca,
Cusco (Pérou).

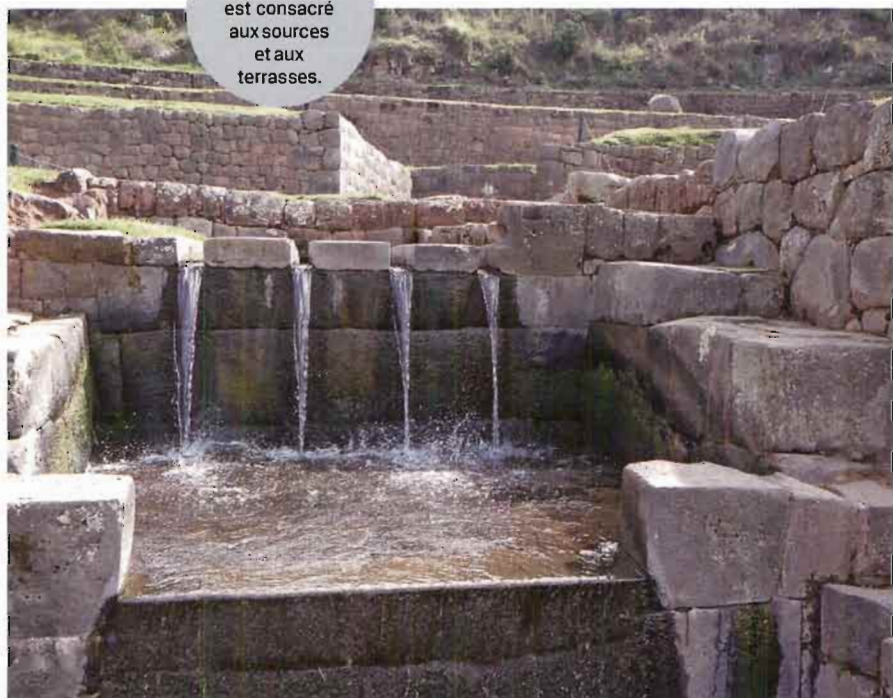


Ces mythes sont à rapprocher de la conception d'Aristote et d'autres philosophes antiques sur l'origine des sources (eau de la mer remontant depuis ce même Tartare dans les mystérieuses cavernes sous les montagnes), partagée en Occident jusqu'au XVIII^e siècle pour expliquer le cycle de l'eau. Mais c'est surtout l'origine mystérieuse des sources, souvent divinisées, qui a le plus engendré de mythes explicatifs, comme si les sources avaient besoin d'actes de naissance.

Rien qu'en France, c'est par dizaines que les sources – les fontaines – sont réputées d'origine surnaturelle, ou miraculeuses, nées parfois d'actes légendaires de personnages historiques (fontaine de Roland dans les Pyrénées), du sabot d'un cheval (Charlemagne à Carcassonne), d'un coup d'épée ou de bâton (Moïse).

En Scandinavie, de telles légendes sont vivaces, comme le montre le film d'Ingmar Bergman *La Source*. Enfin, nombreuses sont les sources que l'on croit fréquentées ou même habitées par des fées, des lutins, voire des fantômes ou des vouivres fabuleuses...

Le site de Tipon (Pérou) est consacré aux sources et aux terrasses.



89 L'hypothèse de colossales quantités d'eau à - 500 km change-t-elle la donne ?

En mars 2014, la publication dans la revue *Nature* d'un article signé par une équipe canadienne de géochimistes agite les médias. Le point de départ est l'analyse d'un diamant de ringwoodite, une sorte d'olivine formée sous de très fortes pressions dans la zone de transition entre les manteaux inférieur et supérieur de la Terre (entre 400 et 600 kilomètres de profondeur). Ce diamant comporte une très faible quantité d'eau (1 %), et les auteurs de l'article émettent l'hypothèse que cette teneur serait extrapolable à toute la zone de transition. Le volume d'eau cachée représenterait une quantité d'eau supérieure au volume d'eau de tous les océans.

Cette idée pourrait accréditer un nouveau mythe, celui d'une Terre qui regorgerait d'eau à grande profondeur, et l'information de la découverte peut être perçue comme une raison de continuer à malmener les eaux souterraines connues, dans la mesure où de nouvelles réserves seraient accessibles dans le futur. Or, dans ces roches très faiblement hydratées, l'eau est totalement liée au cristal de roche et son extraction est chimérique. Dans certains pays où l'exploitation des aquifères conduit à leur disparition d'ici trente à cinquante ans, on a déjà tendance à croire à de nouveaux eldorados de l'eau. On suppose que, lorsqu'il n'y aura plus d'eau dans les différentes nappes, de nouveaux moyens techniques et financiers seront mis au point pour extraire de l'eau ailleurs. De la mer, pensait-on autrefois; des profondeurs de la Terre, penserait-on aujourd'hui... Attention à ne pas jouer à la roulette russe avec les eaux souterraines de notre planète !

90 Surexploitation et pollution : quel bilan pour une gouvernance nécessaire ?

De nombreuses hypothèses s'écrivent sur des guerres internationales de l'eau qui seraient déclenchées à cause de l'accaparement des eaux de surface par des pays situés en amont des fleuves (aux dépens de ceux de l'aval). D'autres imaginent que le XXI^e siècle sera celui de l'or bleu, car il faudra payer de plus en plus cher le service de l'eau. Chaque année, plusieurs

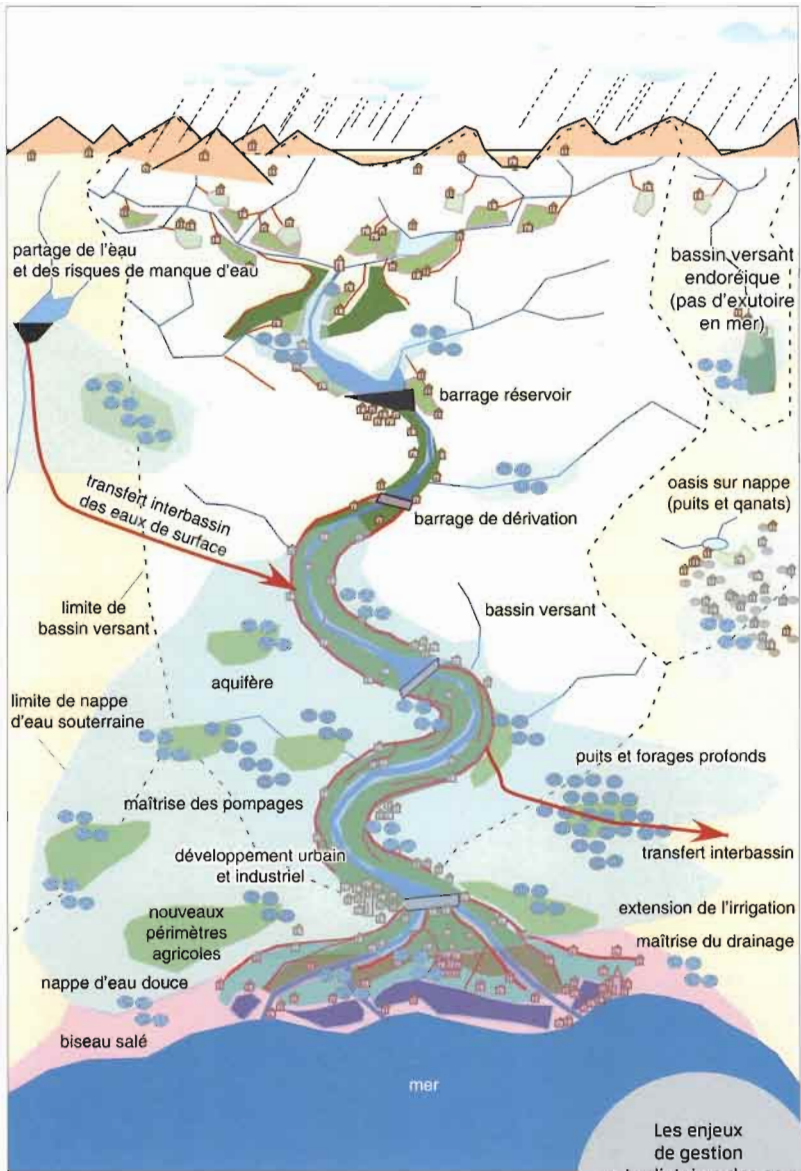
rencontres mondiales mettent l'accent sur les déséquilibres et les injustices liées à l'eau. La société civile se mobilise pour de grandes causes environnementales (préservation de la biodiversité, transition énergétique...). Mais les questions concernant l'eau souterraine mobilisent encore très peu.

En surface, les modèles de gestion des réseaux d'eau sont opérationnels – avec des conflits d'usage mais aussi des formes d'arbitrage : des compromis entre la régulation publique (les agences de l'eau), la coopération locale (les associations d'usagers) et les entreprises privées. Les États ont beau déclarer patrimoine national l'ensemble des eaux de leur territoire, ils ne savent pas appliquer leur intention de réguler l'exploitation des eaux souterraines. Au Nord comme au Sud, les initiatives privées d'extraction de l'eau souterraine sont pour le moment puissantes et conduisent tendanciellement à des crises durables, puisque le renouvellement d'une nappe exige des dizaines d'années ou plus.

Les luttes contre les pollutions sont aussi dans l'agenda des politiques publiques, pourtant toutes les nappes phréatiques reçoivent des centaines de molécules indésirables que nos sociétés produisent, utilisent et jettent. La dégradation de la qualité des eaux ne se corrige pas vite non plus. En Bretagne, des associations ont poursuivi en justice une compagnie délégataire du service de l'eau potable en raison du taux élevé de nitrates provenant de la nappe exploitée par cette société. Mais celle-ci s'est retournée contre l'État français, qui a finalement été condamné pour l'inefficacité de sa politique de protection des eaux souterraines.

Le désarroi est latent un peu partout dans le monde. Pour éviter les pollutions, le principe de pollueur-payeur ne fonctionne pas avec les eaux souterraines car il est pratiquement impossible d'identifier les responsables directs de l'atteinte à l'environnement. Mieux vaudrait renoncer complètement à certains produits nocifs que de les autoriser sur le marché et de tenter de poursuivre ceux qui les utilisent à mauvais escient.

Pour éviter la disparition complète de certaines nappes fossiles et le rabattement accentué des nappes phréatiques, le principe de préleveur-payeur ne fonctionne pas plus, parce que, s'il est possible de repérer une grande partie des puits équipés de pompes sur une image satellite, il est très difficile d'inventorier des forages dont le diamètre du tube de sortie est de 20 centimètres. À supposer qu'on connaisse tous ces



dispositifs, les débits qu'ils prélèvent et leurs durées restent inconnus. Certes, les États exigent que des systèmes de mesure de l'eau prélevée dans la nappe soient installés mais, dans la plupart des cas, les relevés se font à la discrétion des utilisateurs.

On ne sait pas encore gérer de manière durable une nappe. En tous cas, se préparer aux premières grandes crises régionales est important pour que, de ces expériences difficiles, des enseignements puissent être tirés, avec des alternatives mobilisant toutes les sociétés concernées, et viables à long terme. Dans certains pays comme l'Espagne, le Maroc et la Tunisie, la crise a déjà commencé.

Pour agir, il faut connaître à la fois les systèmes hydrologiques distincts et les interactions entre eux. Même les scientifiques ont souvent ignoré l'un ou l'autre, selon leur formation. En réalité, savoir ce qui se passe dans les cycles intermédiaires de l'eau est très complexe; cela implique hydrogéologues et hydrologues, mais aussi toutes les sciences de l'environnement, de l'agronomie, et les sciences sociales. Le schéma p. 143 montre que de nombreuses questions demeurent difficiles à traiter car il faut à la fois établir des diagnostics croisés sur le temps présent, s'appuyer sur l'histoire des lieux, des réseaux et des institutions, et envisager des prospectives selon différents scénarios. Toutes ces connaissances doivent servir le débat public sur l'ensemble de la gestion des eaux. Et mettre en lumière la place de l'eau souterraine dans cet ensemble, en insistant sur son statut nécessaire de bien commun, susceptible d'une gestion concertée et régulée. Les situations étant très diverses, les solutions ne découlent pas d'une recette unique mais de démarches partagées.

**Le Haouz
de Marrakech,
un espace complexe
d'utilisation des
eaux souterraines
et superficielles.**



Bibliographie

Agro-transfert Bretagne, 2009. *Influence des éléments du paysage sur les transferts de l'eau et des polluants associés dans un bassin versant sur socle. Bilan des connaissances applicables dans le contexte pédoclimatique breton*. La démarche Territ'EAU, 124 p.

Carriou A., 2013. Liwa : la mutation d'une oasis agricole en réserve stratégique au service de la sécurisation en eau d'Abou Dhabi. Colloque Les oasis dans la mondialisation : ruptures et continuités. Universités Paris XIII-Nord et Paris-Diderot, 16-17 déc. 2013.

Haurillon R., Tardy C., Femenias M., Figueiral I., 2013. *Lost or forgotten antique hydraulic techniques: recent archaeological discoveries in Languedoc on underground drainage galleries and penstocks tours*. 8th Conference of International Water History Association, Montpellier, 25-29 juin 2013.

Chauve P., 2005. *Des grottes et des sources*. Belin/Pour la science.

Collectif, revue *Géosciences* n° 2 : L'eau souterraine. BRGM, septembre 2005.

Collectif, 2009. *Les eaux souterraines en France* BRGM, coll. Les enjeux des géosciences.

Collin J.-J., 2004. *Les eaux souterraines, connaissances et gestion*. BRGM/Hermann, Orléans-Paris, 169 p.

El Faiz M., Ruf T., 2006. *La gestion collective de l'eau est-elle encore possible dans le Nfis à l'ouest de Marrakech? Coordinations hydrauliques et justices sociales*. 4^e séminaire du PCSI Agropolis, Montpellier, Cirad, 25 et 26 novembre 2004 (actes sous forme de CD).

El Faiz M., Ruf T., 2010. « An introduction to the Khattara in Morocco : two contrasting cases ». In : Schneier-Madanes G. (ed.), Courel M.-F. (ed.), *Water and sustainability in arid regions : bridging the gap between physical and social sciences*. Dordrecht : Springer, p. 151-163.

FAO, 2009. *Les forêts et l'eau*. Étude FAO n° 155, 93 p.

Géosciences, hydrosociences, Observatoire de recherche méditerranéen de l'environnement, 2011. *Gaz de schiste, les questions qui se posent. Contribution au débat sur l'exploration pétrolière dans le sud de la France*. Université de Montpellier, 7 p.

Gilli E., 1999. *Eaux et rivières souterraines*. PUF, coll. Que sais-je.

Guillemin C., Roux J.-C., 1994. *Mystères et réalités des eaux souterraines. La Vie des sciences* n° 2, C.R. T.11, p. 87-114.

Haurillon R., Tardy C., Femenias M., Figueiral I., 2013. *Lost or forgotten antique hydraulic techniques: recent archaeological discoveries in Languedoc on underground drainage galleries and penstocks tours*. 8th Conference of International Water History Association, Montpellier, 25-29 juin 2013.

Jolivet L., « L'eau et la dynamique lithosphérique », *Géosciences* n° 13. BRGM, juillet 2011.

Kobori, Iwao, 1989. « Comparative studies on the formation of qanat water system », *Bulletin of the Institute of Social Sciences* n° 1, vol. 12, Meiji University.

Mahdane M., Lanau S., Ruf T., Valony M.J., 2011. «La gestion des galeries drainantes, (khetaras) dans l'oasis de Skoura, Maroc». In : Dahou T. (dir.), Elloumi M. (dir.), Molle F. (dir.), Gassab M. (dir.), Romagny B. (dir.). *Pouvoirs, sociétés et nature au sud de la Méditerranée*. Paris, Karthala, coll. Hommes et sociétés, p. 209-231.

Margat J., 2008. *Les eaux souterraines dans le monde*. Unesco/PHI/BRGM, Paris-Orléans, 187 p.

Margat J., Van der Gun J., 2013. *Groundwater around the world*, éditions Balkema.

De Marsily G., 2000. «Les eaux cachées : nappes souterraines et eaux minérales». *Revue des deux mondes* n° 9 : L'or bleu, l'eau pour tous.

De Marsily G., 2013. *Les problèmes de l'eau en 26 questions*. Institut de France-Académie des sciences, Paris. Livret sur l'environnement 2013, 31 p.

Ruf T., 2012. «La complexité territoriale de l'irrigation en Méditerranée. Du bassin versant au bassin déversant, une dualité nécessaire pour gérer l'offre et la demande en eau et arbitrer les conflits». In : Aspe C., *De l'eau agricole à l'eau environnementale - Résistance et adaptation aux nouveaux enjeux de partage de l'eau en méditerranée*. Éditions Quæ.

Ruf T., Honegger A. (éd. scient.), 2004. «Gestion sociale de l'eau, concepts, méthodes de recherche et applications», *Territoires en mutation* n° 12.

Ruf T., Valony M.J., 2007. «Les contradictions de la gestion intégrée des ressources en eau dans l'agriculture irriguée méditerranéenne», *Cahiers Agriculture*, 16 (4), p. 294-300.

Taithe A., Galland F., Tertrais B., 2013. *Les aquifères transfrontaliers : caractérisation des tensions et coopérations*. Fondation pour la recherche stratégique, Paris, rapport n° 393/FRS/PSSI, 131 p.

Yazdi A.S., Labbaf Khaneiki M., 2013. *Qanat in its cradle*. International Center on Qanats and Historic Hydraulic Structures, Unesco, Paris.





90 clés pour comprendre les eaux souterraines

L'eau invisible

1	Tous les sols contiennent-ils de l'eau ?	9
2	Quelle place occupe l'eau dans le sous-sol ?	12
3	Quelles sont les particularités des eaux souterraines ?	13
4	Quels sont les échanges entre l'eau et le sol ?	14
5	Quelles régions du monde sont les plus riches en eaux souterraines ?	16
6	Quels sont les endroits les plus arides de la planète ?	18
7	Comment savoir s'il y a de l'eau sous terre ?	19
8	Où sont les ressources d'eau souterraine en France ?	20
9	Y a-t-il autant d'eau sous les continents que dans les océans ?	21
10	Quel âge ont les plus anciennes eaux souterraines ?	22
11	Les eaux souterraines sont-elles pures ?	24
12	L'eau souterraine est-elle différente de l'eau de surface ?	25
13	Y a-t-il de la vie dans les eaux souterraines ?	27
14	Quelle eau « boivent » les plantes ?	28
15	Quelle est la température de l'eau souterraine ?	29
16	L'eau souterraine peut-elle s'évaporer ?	30
17	D'où vient l'eau des geysers et des sources chaudes ?	31
18	Les volcans ont-ils besoin d'eau pour exploser ?	32
19	La Terre a-t-elle de l'eau dans son « manteau » ?	34
20	Y a-t-il de l'eau sous les montagnes ?	35
21	Y a-t-il de l'eau sous les déserts ?	38
22	Y a-t-il des sources d'eau douce sous la mer ?	39
23	L'eau coule-t-elle toujours de haut en bas ?	40
24	L'eau souterraine peut-elle gêner les activités humaines ?	41

L'eau active

25 Comment l'eau circule-t-elle dans le sol ?	43
26 Quand il pleut, où va l'eau ?	46
27 Dans quel sol l'eau s'infiltré-t-elle le mieux ?	48
28 Jusqu'où l'eau peut-elle descendre ?	48
29 Les eaux souterraines font-elles partie du cycle de l'eau ?	49
30 Quels sont les temps de parcours de l'eau dans son cycle planétaire ?	51
31 À quoi ressemble une nappe phréatique ?	53
32 Plusieurs nappes souterraines peuvent-elles se superposer ?	54
33 Comment se renouvellent les nappes d'eau souterraines ?	55
34 Y a-t-il toujours une source à l'origine des rivières ?	57
35 Existe-t-il des lacs souterrains ?	60
36 Y a-t-il une rivière sous la rivière ?	60
37 L'eau souterraine peut-elle provoquer une inondation ?	61
38 Trop d'eau dans le sous-sol crée-t-il une zone humide ?	63
39 Quelle est l'origine des rivières souterraines ?	64
40 L'eau souterraine a-t-elle un pouvoir érosif ?	64
41 Qui sculpte les stalactites et draperies ?	65
42 Les forêts sont-elles gourmandes en eau ?	66
43 Le sol est-il un bon filtre pour l'eau du sous-sol ?	68

L'eau utile

44 Pourquoi l'eau souterraine est-elle prisée ?	71
45 Depuis quand puise-t-on l'eau souterraine ?	72
46 Peut-on cartographier les eaux souterraines ?	72
47 Comment évalue-t-on les ressources en eau souterraine ?	75
48 À qui appartiennent les eaux du sous-sol ?	75
49 Quels sont les acteurs du prélèvement d'eau souterraine ?	76
50 D'où vient l'eau des sources ?	80
51 Comment extrait-on l'eau souterraine ?	82
52 Les eaux souterraines sont-elles potables ?	84
53 Qu'est-ce qui fait d'une eau de source une eau « minérale » ?	85
54 Depuis quand s'intéresse-t-on aux eaux thermales ?	86
55 Les eaux souterraines peuvent-elles être une source d'énergie ?	89
56 Qu'advient-il des fuites des réseaux d'eau potable ?	90
57 Où vont les fuites des réseaux d'eau agricole ?	92
58 Comment des civilisations ont-elles pu se développer loin des fleuves ?	95
59 Peut-on creuser un puits partout ?	96

60 Pourquoi oppose-t-on l'image des puits à celle des sources ?	97
61 Où se trouvent les plus vieux puits du monde ?	98
62 Les puits sont-ils toujours verticaux ?	98
63 Existe-t-il des formes particulières de puits ?	99
64 Pourquoi l'eau des puits n'est-elle pas toujours potable ?	100
65 Jusqu'où peuvent descendre les puits ?	101
66 Qu'est-ce qu'un puits artésien ?	101
67 D'où vient l'eau des oasis ?	102
68 Qu'est-ce qu'une galerie drainante ?	103
69 Toutes les villes anciennes ont-elles leurs galeries drainantes ?	105
70 Qui utilise aujourd'hui des galeries drainantes ?	108

L'eau fragile

71 Peut-on disposer librement de l'eau qui passe dans son sous-sol ?	111
72 Quelle quantité d'eau souterraine extrait-on dans le monde ?	112
73 Où les réserves souterraines sont-elles trop massivement utilisées ?	114
74 L'exploitation des gaz de schiste nuit-elle aux nappes d'eau souterraines ?	116
75 À quelles menaces les eaux souterraines sont-elles vulnérables ?	118
76 Comment protéger l'eau souterraine ?	120
77 Y a-t-il un marché des eaux souterraines ?	121
78 Les eaux souterraines sont-elles éternelles ?	123
79 Et s'il n'y avait plus du tout d'eau dans le sous-sol ?	125
80 La ville n'assèche-t-elle pas son sous-sol ?	126
81 Qui irrigue ses champs avec de l'eau souterraine ?	127
82 Pourquoi ces remontées de sels dans les champs ?	130
83 La mer peut-elle envahir des nappes d'eau souterraines ?	131
84 Le réchauffement climatique va-t-il assécher le sol et le sous-sol ?	132
85 À quelles conditions les galeries drainantes resteront-elles en activité ?	133
86 Le goutte-à-goutte sauvera-t-il les eaux souterraines ?	136
87 L'eau souterraine inspire-t-elle l'art ?	138
88 Les eaux souterraines sont-elles sujettes à des légendes ?	139
89 L'hypothèse de colossales quantités d'eau à - 500 km change-t-elle la donne ?	141
90 Surexploitation et pollution : quel bilan pour une gouvernance nécessaire ?	141



Crédits iconographiques

Toutes les infographies ont été réalisées par Thierry Ruf (sauf page 21 : BRGM ; page 113 : Laurence Laffont), avec l'appui technique de Laurence Laffont.

Toutes les photographies sont de Thierry Ruf, sauf :

Pages 4, 5 bas gauche et milieu, 27, 43, 65 et 81, ainsi qu'en 4^e de couverture (photos haut) : Philippe Crochet.

Pages 5 bas droite, 32 et 151, ainsi que 4^e de couverture (photo bas gauche) : Olivier Garde.

Pages 6, 9, 147 et 4^e de couverture (haut droite) : Jean Weber/Inra.

Page 30 : Roger Clavez/IRD.

Page 33 : IRD Indigo.

Page 34 : Ifremer.

Page 38 : Guénaelle Révenot.

Page 41 : Musée archéologique de Strasbourg.

Pages 70, 71, 87 et 88 : Paul Mounier-Piron.

Page 82 : Jean Margat (vers 1955).

Illustrations photographiques :

En couverture : galerie drainante près de Tinghir (Maroc).

Page 5 haut : source à Jacou (Hérault). Page 6 : puits de l'Île Verte, Vallée-aux-Loups (Hauts-de-Seine). Page 9 : puits du château de Chamorrolles (Loiret). Page 43 : une source du Lison. Page 70 : entrée d'un hôtel thermal à Aix-les-Bains (Savoie). Page 71 : sculpture personnifiant une source d'eau soufrée, à Aix-les-Bains. Page 111 : sol évidé et vendu, en Égypte. Page 146 : source à Ait Inmi (Maroc). Page 147 : cour du château de Chanerolles. Page 151 : geyser en Islande.

Coordination éditoriale : Véronique Leclerc

Édition : Sylvie Blanchard

Création maquette : Gwendolin Butter

Mise en pages et couverture : Marie-Pierre Charbit

Imprimeur : Beta Barcelona





Invisible dans sa majeure partie, l'eau souterraine se manifeste par des émergences ordinaires (sources, puits) ou extraordinaires (geysers, explosions phréatiques, lacs souterrains...) qui permettent de connaître son fonctionnement : eau mouvante ou fixe, permanente, mais pas toujours ni partout disponible.

Les eaux souterraines ont de tout temps été recherchées car leurs qualités, plus constantes que celles des eaux de surface, et l'absence de sédiments font leur intérêt pour la potabilité, l'agriculture et l'industrie. En témoigne la très ancienne technologie des mines d'eau, encore en cours sous diverses formes dans le monde (terrasses aménagées, galeries drainantes). À l'opposé de ces infrastructures ingénieuses gérées collectivement, la multiplication contemporaine des forages, qui s'ajoutent sans contrôle réel aux captages existants, atteste aussi l'enjeu économique de l'eau souterraine. Au début du XXI^e siècle, 2/3 de cette eau serviraient aux irrigations, 1/4 à l'alimentation en eau potable et 1/10^e aux usages industriels. À l'encontre de la croyance en une ressource inépuisable, l'eau souterraine apparaît vulnérable à la pollution, aux aménagements urbains et à la surexploitation, et son extraction impacte les eaux de surface.

Pourquoi l'eau souterraine peut-elle provoquer des inondations ? D'où vient l'eau des sources ? Quel est le rôle du sous-sol ou encore des fuites d'eau dans la recharge des nappes souterraines ? L'exploitation des nappes captives est-elle durable ? Dans ce livre, hydrogéologie, agronomie et sciences sociales se complètent pour proposer en 90 questions une initiation passionnante à ce maillon méconnu du grand cycle de l'eau.

Jean Margat est ingénieur géologue spécialisé en hydrogéologie. Après une carrière au Bureau de recherches géologiques et minières, il est aujourd'hui expert auprès de plusieurs organisations internationales et a reçu en 2008 le prix international d'hydrologie de l'AISH.

Thierry Ruf est agronome et géographe, directeur de recherche à l'IRD et professeur associé à Supagro Montpellier. Il participe à des recherches pluridisciplinaires sur la gestion de l'eau dans plusieurs pays du Sud et en Europe méditerranéenne.

éditions
Quæ

Éditions Cirad, Ifremer, Inra, Irstea
www.quae.com

19,90 €

ISBN 978-2-7592-2190-5



ISSN 2261-3188

Ref. 02436