

Jean Margat
Thierry Ruf

Les
eaux
souterraines
sont-elles
éternelles ?

90
clés pour
comprendre
les eaux
souterraines

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, 2014

ISBN 978-2-7592-2191-2

ISSN 2261-3188

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).

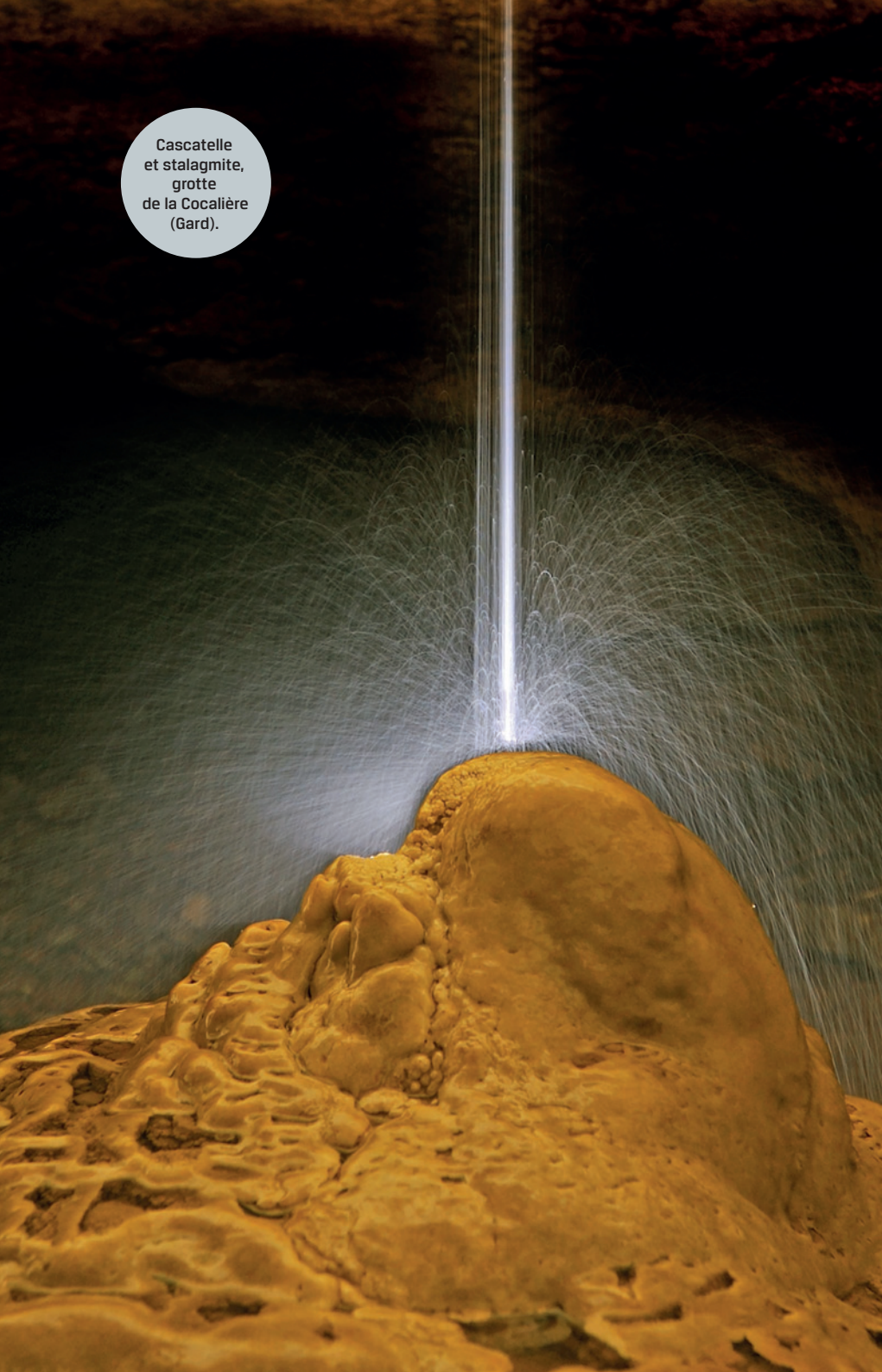
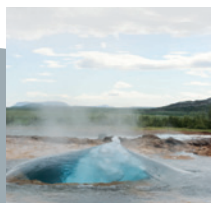


Table des matières



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 ?

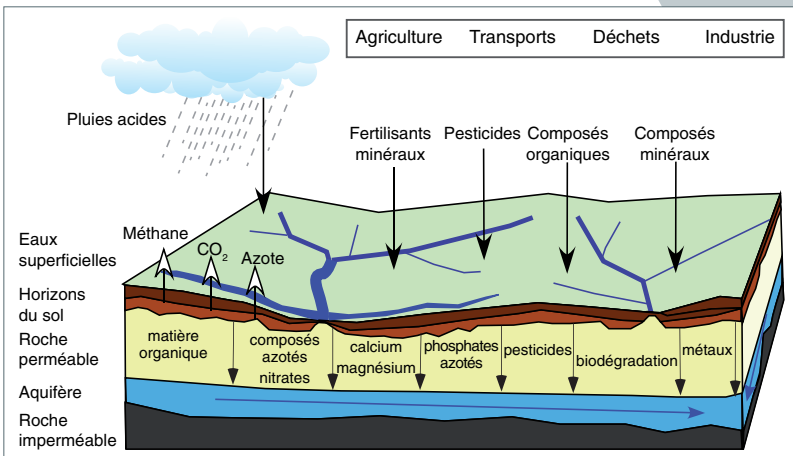
L'évaporation, l'infiltration et la transpiration des plantes induisent de nombreux échanges verticaux entre l'atmosphère et le sol, et entre le sol et le sous-sol (fixation, rétention). De plus, parce que l'eau se déplace aussi latéralement, des échanges existent entre des espaces proches ou distants. 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 Craonne : 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.

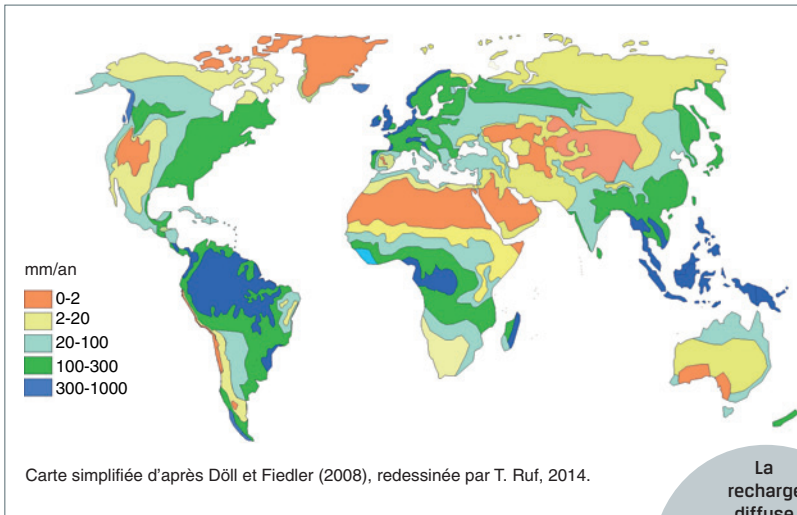
5 Quelles régions du monde sont les plus riches en eaux souterraines ?

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.