



SANTÉ HUMAINE ET EAUX SOUTERRAINES

MESSAGES CLÉS

- La grande qualité de la plupart des eaux souterraines, qui résulte des capacités d'autoépuration des strates de subsurface, a longtemps joué un rôle clé dans la santé et le bien-être humains.
- Plus de 50% de la population mondiale dépend désormais des eaux souterraines pour leur approvisionnement en eau potable de boisson et, dans la plupart des cas, un puits d'eau bien situé et bien conçu représente une source d'eau fiable, économique et sûre.
- Cependant, quelques systèmes phréatiques sont rapidement connectés à la surface terrestre et sont donc plus vulnérables à la pollution issues de la plupart des polluants microbiologiques et chimiques transportés par l'eau.
- L'agriculture intensive implique l'application lourde d'engrais et de pesticides qui peuvent être lessivés par le sol, et constituent ainsi une menace de pollution des eaux souterraines la plus largement répandue dans de nombreux aquifères.
- Certains produits chimiques organiques de synthèse sont extrêmement résistants à la dégradation dans la plupart des systèmes d'eau souterraine et peuvent représenter un danger à long terme pour la santé. Ces produits incluent notamment ce que l'on appelle des polluants organiques émergents.
- Dans certaines conditions, la dissolution l'érosion des roches peut entraîner une contamination naturelle sévère grave (en particulier à l'arsenic et au fluorure) des eaux souterraines.

Pourquoi les ressources en eau souterraine sont-elles d'une importance capitale pour la santé humaine et comment surviennent les problèmes de qualité ?

La qualité microbiologique et chimique naturellement élevée des eaux souterraines, captées aux sources et dans les galeries peu profondes et des puits, a été essentielle à la survie, à bien-être et au développement de l'humanité – et l'est encore aujourd'hui. La pureté des eaux souterraines, associée à leur teneur en minéraux, est telle que de nombreuses sources ont été historiquement considérées comme ayant des vertus médicinales.

Les raisons sous-jacentes de l'excellente qualité microbiologique naturelle des eaux souterraines sont :

- la capacité des sous-sols à retenir et à éliminer les virus, bactéries et parasites fécaux lors de l'infiltration de la recharge
- les temps de séjour généralement longs (des dizaines, voire des milliers d'années) comparés à la survie des agents pathogènes dans le sous-sol (généralement < 50 jours et rarement > 300 jours)

Il existe quelques exceptions potentiellement importantes car certaines formations géologiques peuvent donner lieu à :

- une capacité d'autoépuration bien moindre des agents pathogènes, ce qui accroît la vulnérabilité des aquifères à la pollution.
- une contamination naturelle des eaux souterraines par des éléments traces qui présentent un risque pour la santé (comme l'arsenic ou le fluorure) ou une nuisance pour les consommateurs (comme le fer ou le manganèse dissous).

CAPTAGE D'EAU A USAGE DOMESTIQUE A PARTIR D'UNE SOURCE PROTEGEE en Asie





D'autres problèmes peuvent survenir :

- mauvaises conception et utilisation des unités d'assainissement in situ et des puits avec rejet direct des polluants dans les eaux souterraines
- forte persistance de certains polluants dans la plupart des nappes souterraines (comme le sel, les nitrates et des substances chimiques de synthèse)
- charge de polluants supérieure à la capacité d'autoépuration naturelle (notamment par l'utilisation excessive de fumier et d'effluents urbains)
- conception inappropriée des puits, permettant une connexion zones superficielles contaminées avec les eaux souterraines plus profondes

Si la pollution croissante des eaux souterraines par les produits chimiques entraîne des conséquences sanitaires à long terme de type chronique, la contamination microbiologique d'une source d'eau potable souterraine peut donner lieu à des problèmes immédiats et sévères pour la santé.

Comment empêcher la pollution des eaux souterraines par les matières fécales ?

Les puits et les sources doivent être conçus et construits sérieusement de façon à éviter leur contamination par les matières fécales d'origine humaine et animale à la source et au plus près de celle-ci. L'absence de mesures adéquates peut entraîner une contamination directe grave, comme celle à l'origine de l'épidémie hydrique fatale survenue à Walkerton (Ontario, Canada) en mai 2000.

Les caractéristiques d'écoulement au sein certaines formations géologiques (roches fissurées/fracturées, comme le calcaire de type karstique, et alluvions très grossiers des nappes phréatiques superficielles) entraînent un échange rapide entre les eaux souterraines et la surface de la terre. Ces formations sont ainsi beaucoup plus vulnérables à la contamination par des agents pathogènes (bactéries et virus fécaux ou même protozoaires, comme *Cryptosporidium* et *Giardia*).

Les sources d'eau potable de ces formations peuvent représenter un risque pour la santé humaine, sauf si elles sont préservées de manière appropriée par des zones de protection et une désinfection régulière du système d'approvisionnement en tant que deuxième barrière. Cependant, certains agents pathogènes, comme *Cryptosporidium* (que l'on trouve très couramment dans les excréments des jeunes animaux d'élevage), ne sont pas

éliminés par les désinfections régulières et nécessitent une microfiltration poussée. Une construction et une protection soignées sont donc essentielles pour prévenir la pollution fécale de ces sources d'eaux souterraines.

Elles doivent reposer sur une compréhension détaillée de l'écoulement des eaux souterraines, sur des zones correctement dimensionnées et surveillées (avec des clôtures pour empêcher le pâturage des animaux dans les dolines et les espaces dépourvus de sol), et sur une conception appropriée de l'assainissement in situ et de la gestion des fosses septiques.

Une attention particulière doit être portée aux puits d'eau et aux sources servant d'approvisionnement en eau domestique, par exemple dans les zones rurales de tous les pays et dans les villes en plein développement. Or, la multitude de petite sources individuelles ne se prête pas à la création de zones de protection et de stations d'épuration. Dans ce cas, l'amélioration de l'assainissement est une priorité majeure, au même titre que le maintien de la séparation verticale et horizontale entre les dispositifs d'assainissement autonome et les zones de captage des puits.

AGENTS PATHOGÈNES : SÉLECTION DES ORGANISMES POTENTIELLEMENT TRANSMIS PAR L'EAU POTABLE DE BOISSON

ESPÈCES PATHOGÈNES	PERSISTANCE DANS L'EAU	RÉSISTANCE EAU CHLORE
PROTOZOAIRES		
<i>Cryptosporidium parvum</i>	longue	haute
<i>Giardia intestinalis</i>	modérée	haute
<i>Entamoeba histolytica</i>	modérée	haute
BACTÉRIES		
<i>Campylobacter jejuni</i>	modérée	faible
<i>Escherichia coli</i>	modérée	faible
<i>Leptospira spp</i>	longue	faible
<i>Salmonella typhi</i>	modérée	faible
<i>Shigella spp</i>	courte	faible
<i>Vibrio cholerae</i>	courte à longue	faible
VIRUS		
<i>Entéroviruses</i>	longue	modérée
<i>Hépatitis A & E</i>	longue	modérée
<i>Noroviruses</i>	longue	modérée
<i>Rotaviruses</i>	longue	modérée

**DIRECTIVES DE L'OMS SUR LA QUALITÉ DE L'EAU POTABLE :
VALEURS GUIDES POUR LES POLLUANTS CHIMIQUES (a)**

POLLUANTS NATURELS

arsenic	10
baryum	700
boron	2400
fluorure	1500 (b)
sélénium	40
uranium	30

POLLUANTS ISSUS DE L'AGRICULTURE

nitrate	50,000 (c)
nitrite	3,000 (c)
alachlore	20
aldicarbe	10 (d)
atrazine	100 (e)
carbofuran	7
chlordane	0.2
chlorotoluron	30
2,4-D	30
dichlorprop	100
dimethoate	6
DDT	1 (f)
fénoprop	9
isoproturon	9
lindane	2
MCPA	2
mécoprop	10
méthoxychlor	20
métolachlor	10
simazine	2

**POLLUANTS ISSUS DE L'INDUSTRIE
ET DE L'USAGE PRIVÉ**

cadmium	3
chromium	50 (g)
mercure	6 (h)
benzène	10
tétrachlorure de carbone	4
dichlorométhane	20
éthylbenzène	300
pentachlorophénol	9
tétrachloroéthène	40
toluène	700
trichloroéthène	20
xylènes	500

- (a) exprimé en µg/l (ppb), bien que certains analytes soient généralement mesurés en mg/l (la valeur en mg/l est divisée par 1 000 pour obtenir une valeur en µg/l); certains pays-tolèrent des valeurs plus ou moins élevées pour certains polluants
- (b) mais tenir compte de tous les apports
- (c) peut aussi être dérivé des eaux usées
- (d) sulfoxyde et sulfone
- (e) hydroxyatrazine 200 µg/l
- (f) désormais principalement issu d'usages non agricoles
- (g) chrome total
- (h) mercure inorganique

Les connaissances concernant la survie des agents pathogènes sous la surface sont encore insuffisantes, mais la recherche est aujourd'hui soutenue par de nouvelles techniques de biologie moléculaire (qPCR). L'apparition de souches pathogènes résistantes aux antibiotiques commence également à susciter des inquiétudes.

Quelles sont les principales causes de la pollution chimique des eaux souterraines ?

(A) Utilisation des sols à des fins agricoles

La production agricole fondée sur l'utilisation intensive d'engrais inorganiques, de fumiers organiques et de produits phytosanitaires s'est développée rapidement au cours des 30 à 60 dernières années. Elle est d'autant plus intensive sur les terres irriguées. Bien souvent, l'épandage d'engrais dépasse les besoins des cultures (après la prise en compte du nitrate généré par les sols ou déjà contenu dans l'eau d'irrigation) et/ou il s'effectue au mauvais moment. Dans le cas des sols perméables, cela se traduit par une lixiviation généralisée des nitrates dans les nappes souterraines à des niveaux qui dépassent de loin les 50 mg/l.

Ce phénomène concerne aussi les produits phytosanitaires. Les pesticides en particulier, sont conçus pour être toxiques pour les mauvaises herbes, les insectes et les rongeurs. On dénombrait d'ailleurs plus de 1,700 substances actives parmi 45,000 références de pesticides sur le marché. Ceci, combiné à la confidentialité des fabricants, rend difficile l'obtention de données d'application précises. Un grand nombre de pesticides (ou leurs produits de dégradation partiels appelés métabolites) a été détecté localement dans les eaux souterraines à des concentrations supérieures aux recommandations de l'OMS pour les eaux potables).

**ÉPANDAGE DE PESTICIDE
AGRICOLE SUR UN SOL PERMÉABLE**



Les pesticides sont de plus en plus souvent conçus pour avoir une demi-vie plus courte dans le sol (et ne devraient donc pas se retrouver dans les eaux souterraines), mais malheureusement, leur persistance en profondeur peut être beaucoup plus longue (en raison d'une population microbienne moins importantes pour leur dégradation dans le sol) et des composés les plus solubles sont facilement lessivés lors de la recharge des eaux souterraines.

Parmi les mesures de protection des eaux souterraines utilisées pour l'approvisionnement en eau potable, on compte :

- l'exclusion de certains types d'agriculture intensive dans les périmètres de protection des captages
- l'interdiction à la vente des substances pesticides les plus persistantes dans les eaux souterraines
- l'amélioration des pratiques agricoles de culture, d'élevage et d'irrigation dans le but d'éviter le recours aux mesures agrochimiques excessives (telles que la rotation des cultures, l'utilisation de cultures couverture pour éviter la jachère, le semis direct pour réduire l'aération des sols, et pas de recours aux engrais si l'eau d'irrigation est riche en nitrates).

(B) Produits chimiques industriels et carburants hydrocarbonés

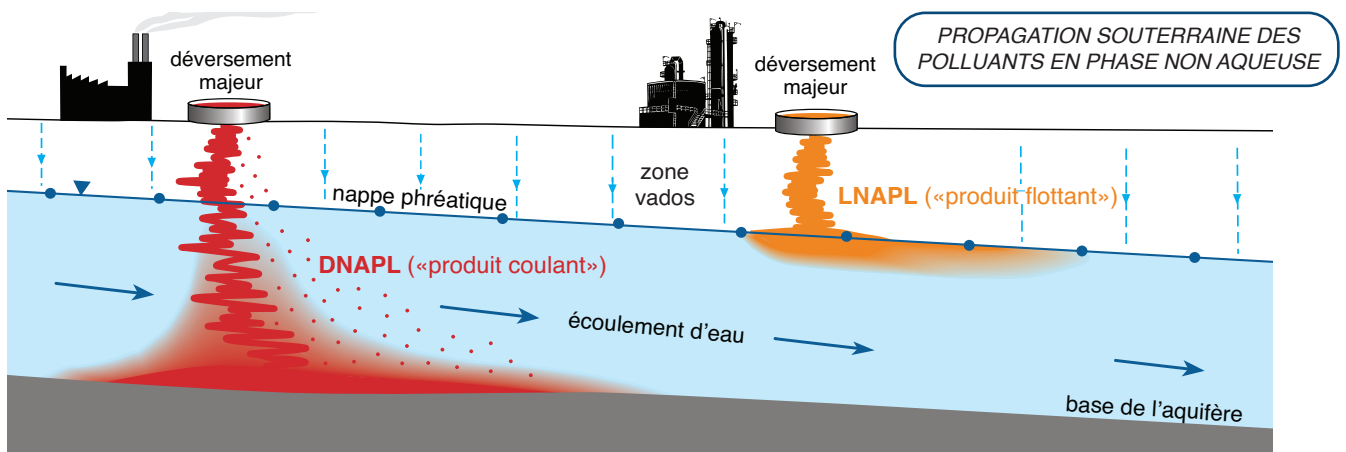
La pollution des eaux souterraines peut aussi être causée par les déversements et les fuites provenant de cuves de stockage, de sites de décharge, de stations-services, d'entreprises de nettoyage à sec, d'usines de production chimique et bien d'autres sources. Les polluants industriels possèdent une grande variété de propriétés, ce qui complexifie leur comportement de migration dans les sédiments et les roches. Les polluants les plus courants dans

les eaux souterraines incluent principalement les hydrocarbures chlorés et pétroliers d'origine humaine, et peuvent être classés en deux grands groupes :

- les liquides légers en phase non aqueuse (LNAPL ou «produits flottants», comme les composés de l'essence et du diesel), qui traversent la zone vadose pour s'accumuler à la surface de la nappe phréatique
- les liquides denses en phase non aqueuse (DNAPL ou «produits de fonds», comme les solvants chlorés de type trichloroéthène, chlorobenzène, etc.), qui traversent les couches perméables sous l'action de la gravité jusqu'à atteindre une couche imperméable à des dizaines, voire des centaines de mètres sous la surface du sol et la nappe phréatique.

En raison de l'hydrosolubilité limitée de ces composés, ils s'accumulent et perdurent parfois pendant plusieurs siècles. Cependant leur mobilité en phase dissoute constitue une menace à long terme pour la qualité des eaux souterraines, les sources ponctuelles créant de longs panaches bien définis. Si la position du panache est connue, il est possible de rediriger le captage des eaux souterraines pour empêcher la pénétration des polluants dans les zones de captage pour l'eau potable. De plus, certaines propriétés aquifères (comme les conditions de réduction et d'oxydation) peuvent jouer un rôle clé dans la dégradation in situ des polluants.

Bien que ces composés soient hydrophobes (ou du moins faiblement solubles dans l'eau), leur solubilité reste de plusieurs ordres de grandeur supérieurs aux seuils de l'eau potable et de la santé des écosystèmes. En raison de leur large spectre de toxicité, les solvants comme le tétrachloroéthène, les trihalométhane (p. ex., le chloroforme)



et les composés de l'essence comme le toluène et le méthyl tert-butyl éther (MTBE) sont les groupes de polluants organiques volatils les plus souvent détectés dans les eaux souterraines. Nombre de ces polluants sont considérés comme cancérogènes pour les humains en cas d'ingestion, d'inhalation ou de contact avec la peau. De nouveaux polluants émergents d'origine industrielle sont identifiés dans les eaux souterraines, notamment le 1,4-dioxane, la N-nitrosodiméthylamine et les composés perfluorés.

(C) Élimination et réutilisation des eaux usées

À l'intérieur et autour des villes disposant d'un réseau d'égouts importants, les pratiques d'élimination et de réutilisation des eaux usées peuvent engendrer un risque sanitaire en raison des multiples voies potentielles d'infiltration des eaux usées dans les 'eaux souterraines. En effet, ce processus peut entraîner une pollution à l'ammonium, aux nitrates, ainsi qu'aux produits chimiques issus de l'industrie et de l'usage privé, en particulier au niveau des puits non protégés.

La pollution à l'état de traces des eaux souterraines par des produits chimiques organiques synthétiques peut aussi inclure des perturbateurs endocriniens et des composés cancérogènes présents dans les produits pharmaceutiques, les plastiques et les résines époxy. Le devenir de ces substances appelées contaminants organiques émergents (COEs), dans les eaux souterraines n'a pas encore fait l'objet d'études approfondies, contrairement à d'autres contaminants anthropiques.

Parmi les principaux COEs à surveiller, on compte la carbamazépine, le sulfaméthoxazole, l'ibuprofène et le bisphénol, qui pénètrent dans les eaux souterraines par le biais de fuite d'égouts et de systèmes d'assainissement autonomes. Une concentration importante (100 ng/l) de certains COEs a été détectée dans plusieurs sources d'eau souterraine à travers le monde, et nombre de ces polluants figurent parmi les substances à réglementer en priorité en raison de leur impact potentiel sur l'environnement et la santé humaine.

Quels sont les principaux problèmes en matière de contamination des eaux souterraines ?

L'interaction entre l'eau de percolation et la roche hôte peut elle aussi quelquefois affecter la qualité de l'eau, car bon nombre de polluants



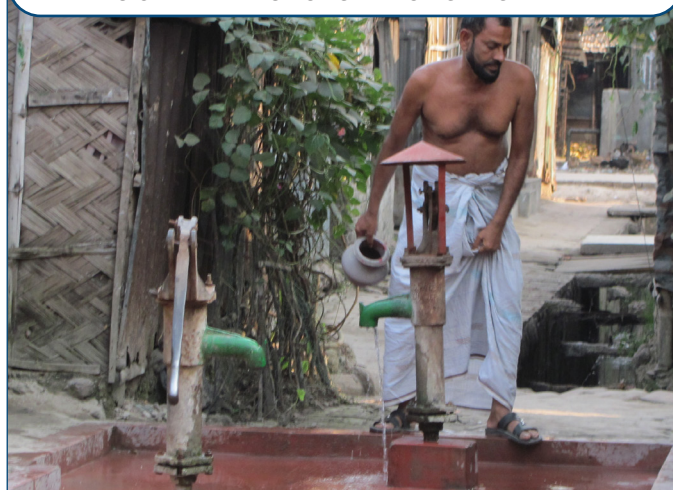
FLUOROSE DENTAIRE EN TANZANIE ET KÉRATOSE ARSENICALE AU BANGLADESH

naturels se dissolvent dans les eaux souterraines. Le fluorure et l'arsenic constituent de loin les polluants les plus préoccupants en termes d'extension géographique, de populations affectées et d'impact sur les êtres humains. Bien que la forte salinité des sources d'eau peut aussi affecter la santé maternelle, la présence de fer et de manganèse dissous donne un goût désagréable à l'eau et tache le linge (ce qui est souvent inacceptable aux yeux des consommateurs).

Les régions les plus arides qui présentent un terrain granitique et volcanique sont particulièrement exposées à la contamination au fluorure des eaux souterraines et à la fluorose endémique qui en résulte. On estime à 200 millions le nombre de personnes à travers le monde consommant une eau dont le taux de fluorure est supérieur aux recommandations de l'OMS (1,5 mg/L, soit 1 500 µg/L).

Les problèmes liés au fluorure constituent une contrainte pour l'approvisionnement en eau

PUITS À POMPE MANUELLE AU BANGLADESH, AVEC UN BEC VERSEUR VERT INDIQUANT UNE EAU SOUTERRAINE EXEMPT D'ARSENIC (LES BECS SERSEURS ROUGES SIGNALENT LES PUIITS D'EAU NON POTABLE)





SANTÉ HUMAINE ET EAUX SOUTERRAINES

potable en milieu rural dans de nombreuses régions déjà confrontées à un stress hydrique. Au terme de 20 ans d'enquête, de fortes concentrations d'arsenic dans les eaux souterraines sont été observées à faible profondeur dans de vastes régions d'Asie du Sud -Est ainsi que dans certaines parties d'Amérique-Latine.

Les effets néfastes d'une exposition chronique à l'arsenic dans l'eau potable peuvent entraîner des maladies cutanées et des cancers. On observe des taux particulièrement élevés d'arsenic dans les eaux souterraines des grandes plaines deltaïques et alluviales ainsi que des bassins intérieurs arides, avec le Bangladesh, particulièrement touché. Malgré d'importants efforts d'atténuation depuis sa découverte il y a 20 ans, l'exposition à l'arsenic reste élevée au sein de la population bengalaise : environ 45 millions de personnes sont affectées par un taux supérieur aux valeurs guides de l'OMS pour l'eau de boisson.

Pour atténuer les problèmes liés à la présence d'arsenic et de fluorure dans les eaux souterraines, plusieurs mesures doivent être prises :

- des études hydrogéologiques détaillées pour mieux comprendre leur distribution et leur mobilité, et pour identifier les eaux souterraines non contaminées
- une signalétique claire des puits d'eau à risque afin de prévenir les utilisateurs des contraintes d'utilisation
- l'implantation de stations de traitement de tailles variées, selon le type de puits d'eau concerné

BIBLIOGRAPHIE

- Daughton C G 2004 Groundwater recharge and chemical contaminants - challenges in communicating the connections and collisions of two disparate worlds *Ground Water Monitoring & Remediation* 24:127-138
- Edmunds W M & Smedley P L 2013 Fluoride in natural waters. *Essentials of Medical Geology* 311-336. Springer (Berlin).
- Fendorf S et al 2010. Spatial and temporal variations of groundwater arsenic in South and South-East Asia. *Science* 28 : 1123-1127.
- Foster S & Candela L 2008 Diffuse groundwater quality impacts from agricultural land-use: management and policy implications of scientific realities. *RSC Groundwater Science & Policy* 457-474. CRC Publishing (London).
- Morris B L & Foster S S D 2000 Cryptosporidium contaminant hazard assessment and risk management for British groundwater sources. *Water Science Technology* 41 : 67-77.
- Poch-Massegú R et al 2014 Irrigation return flow and nitrate leaching under different crops and irrigation methods in western Mediterranean weather conditions. *Agricultural Water Management* 134 : 1-13.
- Pankow J F & Cherry J A 1996 Dense chlorinated solvents and other DNAPLs in groundwater. Waterloo Press (Ontario).
- Sorensen J P R et al 2015 Tracing enteric pathogen contamination in Sub-Saharan African groundwater. *Science of Total Environment* 538 : 888-895.
- WHO 2011 Guidelines for Drinking-Water Quality—4th Edition. World Health Organisation (Geneva).
- Zogorski J S et al 2006 Volatile organic compounds in the nation's groundwater and drinking-water supply wells. *US Geological Survey Circular* 1292 (Virginia).

MESURES

- Toutes les sources d'eau souterraine utilisées pour l'eau potable doivent être parfaitement sécurisées afin d'exclure tout risque de contamination directe (par exemple, d'agents infectieux, de combustibles ou lubrifiants hydrocarbonés, ou d'autres polluants).
- Les aquifères exploités pour l'eau potable doivent faire l'objet de suivis et contrôles systématiques afin d'évaluer leur vulnérabilité à la pollution et le danger de pollution réel, lesquels devront ensuite être gérés par l'instauration de périmètres de protection des captages surveillés et de taille suffisante.
- Toutes les sources d'eau souterraine destinées à la consommation humaine doivent être soumises à un suivi de la qualité, notamment du point de vue des risques perçus de pollution et de contamination. En l'absence de traitement, les eaux présentant un risque sérieux (ou déjà affectées impactées) doivent être signalées comme non potables.
- Afin d'atteindre les objectifs de développement durable de l'ONU pour 2023, une accélération de l'assainissement est nécessaire dans les zones périurbaines et les villages ruraux, à défaut de quoi la qualité des eaux souterraines pour la consommation humaine potables risque d'être de plus en plus menacée.
- Nous devons poursuivre et intensifier les recherches sur le devenir (et la persistance) des agents pathogènes et de certaines substances organiques dans la sous-sol afin d'orienter les politiques d'utilisation et de protection des eaux souterraines.