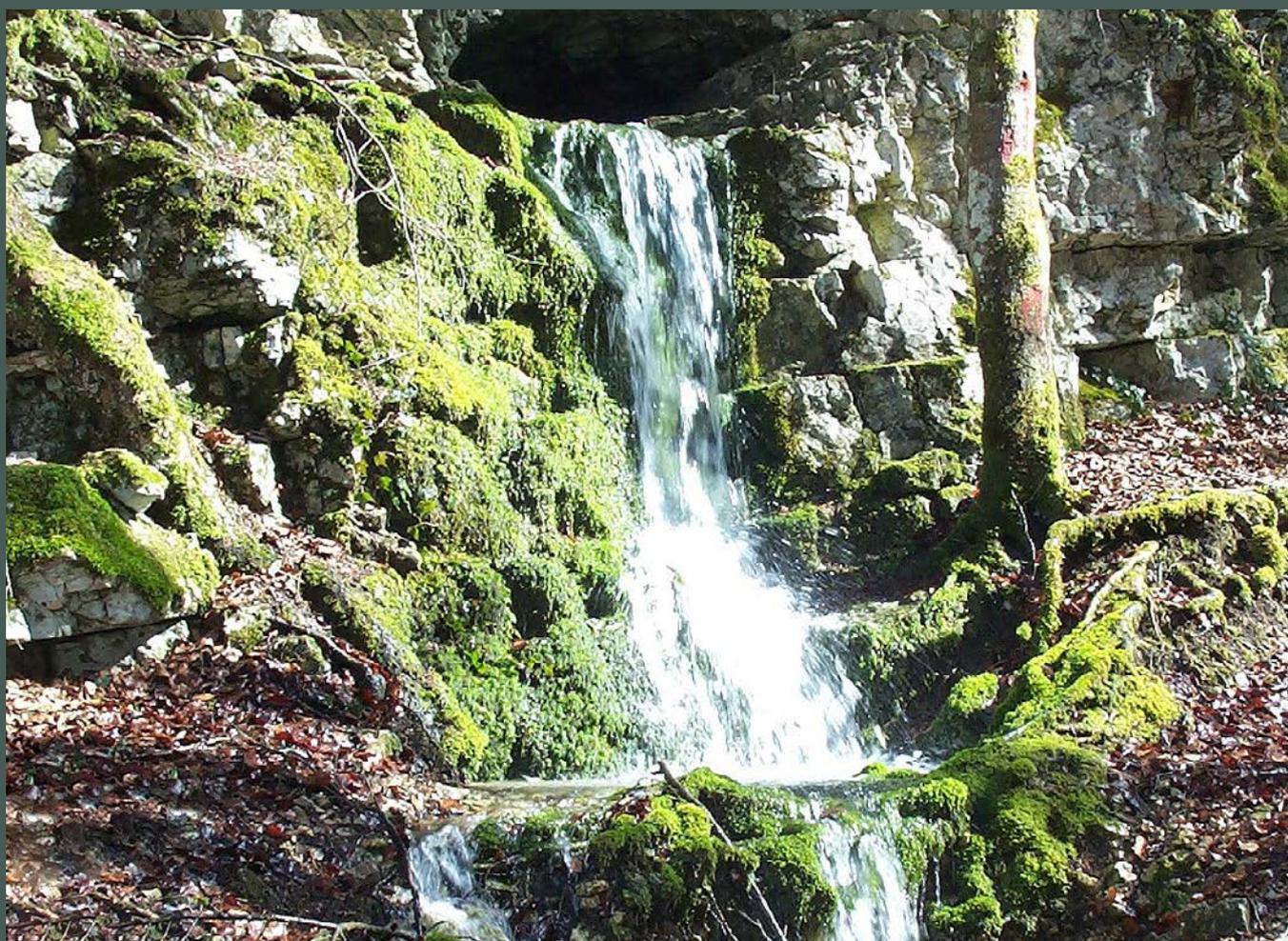


Évaluation de sites pollués en milieu karstique

Un module de l'aide à l'exécution « Investigation de sites pollués »



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'environnement OFEV

Évaluation de sites pollués en milieu karstique

Un module de l'aide à l'exécution « Investigation de sites pollués »

Impressum

Valeur juridique

La présente publication est une aide à l'exécution élaborée par l'OFEV en tant qu'autorité de surveillance. Destinée en premier lieu aux autorités d'exécution, elle concrétise les exigences du droit fédéral de l'environnement (notions juridiques indéterminées, portée et exercice du pouvoir d'appréciation) et favorise ainsi une application uniforme de la législation. Si les autorités d'exécution en tiennent compte, elles peuvent partir du principe que leurs décisions seront conformes au droit fédéral. D'autres solutions sont aussi licites dans la mesure où elles sont conformes au droit en vigueur.

Éditeur

Office fédéral de l'environnement (OFEV)

L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Auteurs

Reto Tietz, division Sols et biotechnologie

Christiane Wermeille, division Sols et biotechnologie

Hélène Demougeot-Renard, eOde Sàrl, Neuchâtel

André Bapst, MFR Géologie-Géotechnique SA, Bienne

Philippe Renard, Université de Neuchâtel, Centre

d'Hydrogéologie et de Géothermie (CHYN)

Accompagnement à l'OFEV

Juliane Eismann Billet, division Droit

Ronald Kozel, division Hydrologie

Groupe d'accompagnement

Marc Affolter, Direction générale de l'environnement (VD)

Gérald Burnier, Direction générale de l'environnement (VD)

Isabelle Butty, Service de l'énergie et de l'environnement (NE)

Christophe Badertscher, Office de l'environnement (JU)

Jean-Pierre Clément, Office des eaux et des déchets (BE)

Jean Fernex, Office de l'environnement (JU)

François Gainon, Service de l'énergie et de l'environnement (NE)

Olivier Kissling, Office des eaux et des déchets (BE)

André Kissling, Direction générale de l'environnement (VD)

Petra Ogermann, Amt für Umweltschutz und Energie (BL)

Karl Stransky, Amt für Umwelt (SO)

Edgar Stutz, Service de l'énergie et de l'environnement (NE)

Jürgen Van der Voet, Abteilung für Umwelt (AG)

Référence bibliographique

OFEV (éd.) 2018 : Évaluation de sites pollués en milieu karstique.

Un module de l'aide à l'exécution « Investigation de sites pollués ». L'environnement pratique n° 1821 : 22 p.

Mise en page

Cavelti AG, medien. digital und gedruckt, Gossau

Photo de couverture

Émissaire de la source des Blanches Fontaines.

Undervelier, commune de Haute-Sorne (canton du Jura).

© MFR Géologie-Géotechnique SA, Bienne

Téléchargement au format PDF

www.bafu.admin.ch/uv-1821-f

Il n'est pas possible de commander une version imprimée.

Cette publication est également disponible en allemand.

© OFEV 2018

Table des matières

Abstracts	5
------------------	----------

Avant-propos	6
---------------------	----------

1 Introduction	7
1.1 But du module d'aide à l'exécution	7
1.2 Public cible	8

2 Bases légales	9
------------------------	----------

3 Les problèmes posés par l'application de l'OSites en milieu karstiques	11
3.1 Le transport des polluants en milieu karstique	11
3.2 Des pollutions à l'échelle du bassin d'alimentation	12
3.3 Prélèvement d'eau souterraine en aval immédiat du site	13
3.4 Analyse d'eau souterraine d'une source captée en aval du site	13

4 Démarche pour évaluer les atteintes à l'eau souterraine	14
4.1 Les éléments d'évaluation	14
4.2 Évaluation des sites pollués en connexion hydraulique avec un captage d'eau potable d'intérêt public ou un périmètre de protection des eaux souterraines	15
4.3 Évaluation des sites pollués en amont d'un captage d'intérêt privé ou d'une source non captée	16
4.4 Suite de la procédure	18

5 Mesures d'investigation et de surveillance spécifiques	19
5.1 Analyses des sources karstiques	19
5.2 Connexion hydraulique entre le site pollué et la source karstique	19
5.3 Analyses du lixiviat de matériaux solides ou d'eau de percolation	20
5.4 Procédure à suivre en présence de plusieurs sites pollués dans le bassin d'alimentation	20

Glossaire	21
------------------	-----------

Abstracts

This publication describes a procedure to investigate and assess the monitoring and remediation requirements of polluted sites in karst areas with regard to ground water as a protected resource. The procedure is based on the Contaminated Sites Ordinance (CSO) and on pollution potential, emission behaviour at the site and investigation of the karst springs in the outflow region of the site.

Cette publication présente une démarche d'investigation et d'évaluation des besoins de surveillance et d'assainissement des sites pollués en milieu karstique du point de vue de la protection des eaux souterraines. Cette démarche s'inscrit dans le cadre de l'ordonnance sur les sites contaminés et s'appuie sur le potentiel de pollution, sur le comportement des émissions sur le site et sur l'analyse des sources karstiques en aval.

Diese Publikation beschreibt ein Verfahren zur Untersuchung und Beurteilung des Überwachungs- und Sanierungsbedarfs von belasteten Standorten in Karstgebieten hinsichtlich des Schutzguts Grundwasser. Das Verfahren stützt sich auf die Altlasten-Verordnung (AltIV) und auf das Schadstoffpotential, das Emissionsverhalten am Standort sowie die Untersuchung der Karstquellen im Abstrombereich des Standorts.

La presente pubblicazione descrive una procedura di indagine e di valutazione della necessità di sorveglianza e di risanamento dei siti inquinati ubicati in zone carsiche dal punto di vista della protezione delle acque sotterranee. La procedura si basa sull'ordinanza sui siti contaminati (OSiti), sul potenziale di inquinamento, sulla dinamica delle emissioni nel sito e sull'indagine delle sorgenti carsiche nella corrente a valle del sito.

Keywords:

karst, assessment of polluted sites, investigation, ground water, immediate outflow region, karst spring

Mots-clés :

karst, évaluation des sites pollués, investigation, eau souterraine, aval immédiat, source karstique

Stichwörter:

Karst, Beurteilung von belasteten Standorten, Untersuchung, Grundwasser, unmittelbarer Abstrombereich, Karstquelle

Parole chiave:

Carsismo, valutazione dei siti inquinati, indagine, acque sotterranee, corrente immediatamente a valle del sito, sorgente carsica

Avant-propos

Depuis l'entrée en vigueur de l'ordonnance sur les sites contaminés, les méthodes d'investigation et d'évaluation des sites pollués se trouvant sur des aquifères poreux ont fait leurs preuves. Depuis, une grande partie des sites nécessitant une investigation ont pu être analysés et évalués, et les investigations restantes sont planifiées. Les sites pollués situés en milieu karstique, quant à eux, présentent une situation différente. Les critères d'évaluation usuels n'étaient dans ce cas pas applicables, raison pour laquelle les cantons de l'Arc jurassien ont demandé à l'Office fédéral de l'environnement d'élaborer une réglementation spécifique. Le module d'aide à l'exécution correspondant, réalisé grâce à la collaboration active de ces cantons, est aujourd'hui disponible et permet désormais de déterminer plus clairement les mesures à prendre sur les sites pollués localisés sur le karst.

Franziska Schwarz
Sous-directrice
Office fédéral de l'environnement (OFEV)

1 Introduction

L'ordonnance du 26 août 1998 sur les sites contaminés (OSites) définit les conditions d'investigation et d'évaluation des sites pollués par les autorités d'exécution. Le besoin de surveillance et d'assainissement est établi en appréciant les émissions des sites vers les biens environnementaux à protéger, qui regroupent les eaux souterraines, les eaux de surface, le sol et l'air, ainsi que leurs effets sur ces biens. Des valeurs de référence pour les concentrations dans les eaux, l'air interstitiel du sol et le sol sont définies dans les annexes de l'OSites, et leurs conditions d'application aux milieux à protéger sont décrites dans les art. 9 à 12. Les modalités techniques d'investigation pour collecter les données requises sont quant à elles précisées dans les aides à l'exécution établies par l'OFEV¹.

Les conditions d'évaluation de l'impact de la pollution des sites sur les eaux souterraines ont été élaborées pour des milieux aquifères poreux. Ceux-ci constituent en effet une part très importante des ressources utilisées pour l'eau potable en Suisse. Elles posent toutefois des difficultés d'application aux milieux karstiques, qui constituent une part non négligeable des réserves en eau du pays (Grundwasserressourcen der Schweiz; Aqua & Gas No. 9, Sinreich et al. 2012). Le karst recouvre en effet environ 20 % du territoire et contribue à l'alimentation en eau de près de 20 % des ménages (ISSKA, 2012). En outre, environ 15 % des sites pollués suisses sont localisés dans un bassin d'alimentation karstique.

La présente aide à l'exécution est étroitement liée au rapport d'experts « Moyens d'investigation des sites pollués en milieu karstique », réalisé par les bureaux eOde et MFR et le Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie. Ce rapport présente les méthodes d'investigation pouvant être utilisées pour l'appréciation du potentiel de pollution et de mobilisation, pour la compréhension du contexte géologique et hydrogéologique d'un site, pour la détermination du bassin d'alimentation hydrogéologique et l'établissement de la preuve de la connexion hydraulique, ainsi que pour le prélèvement d'échantillons d'eau représentatifs

dans des sources karstiques. Ces méthodes ne seront donc pas traitées dans le présent document.

1.1 But du module d'aide à l'exécution

Les chapitres suivants présentent la démarche d'investigation et d'évaluation des sites pollués en milieu karstique du point de vue de la protection des eaux souterraines. Bien que cette démarche s'inscrive toujours dans le cadre de l'OSites, elle a été adaptée par rapport à la procédure conventionnelle afin de fournir une solution applicable au milieu karstique.

L'évaluation préalable destinée à vérifier si des investigations sont nécessaires (évaluation préliminaire) n'est pas traitée dans le présent module d'aide à l'exécution. Comme pour les sites se trouvant sur des aquifères poreux, l'évaluation préliminaire doit se faire au cas par cas sur la base d'une première estimation de la mise en danger, en tenant compte du potentiel de pollution, du potentiel de mobilisation et des biens à protéger potentiellement exposés.

Si les eaux souterraines situées en aval immédiat du site peuvent être échantillonnées de manière représentative avec des moyens raisonnables en milieu karstique, ou si l'eau potentiellement polluée s'écoule en aval immédiat dans des terrains aquifères poreux recouvrant les terrains karstiques, l'investigation et l'évaluation du site doivent se faire selon les méthodes habituellement utilisées pour des milieux aquifères poreux.

De même, la présente aide à l'exécution n'est pas applicable à l'évaluation d'installations de tir se trouvant sur un sous-sol karstique. L'investigation et l'évaluation des installations de tir font en effet l'objet d'une communication de l'OFEV (www.bafu.admin.ch/uv-0634-f).

1.2 Public cible

Ce module d'aide à l'exécution s'adresse aux :

- autorités d'exécution, qui doivent se déterminer sur les procédures d'investigation et évaluer le besoin de surveillance ou d'assainissement des sites pollués en milieu karstique ;
- géologues et spécialistes des sites pollués, qui sont mandatés pour investiguer et évaluer des sites en milieux karstiques du point de vue de la protection des eaux souterraines ;
- propriétaires de sites en milieu karstique, lesquels doivent mandater les investigations et reçoivent l'évaluation de leurs sites de la part de l'autorité d'exécution concernée (canton ou confédération).

2 Bases légales

Le traitement des sites pollués relève des art. 32c à 32e de la section 4 de la loi fédérale du 7 octobre 1983 sur la protection de l'environnement (LPE; RS 814.01).

Il se fonde sur quelques principes généraux. On retient parmi ceux-ci que :

- les sites pollués sont assainis s'ils causent des atteintes nuisibles ou incommodantes à l'environnement, ou s'il existe un danger concret que de telles atteintes apparaissent (cf. art. 32c, al. 1, LPE);
- les sites pollués sont évalués de manière individuelle;
- les frais des mesures sont majoritairement pris en charge par les responsables de la pollution, par application du principe « pollueur-payeur » (cf. art. 32d LPE, art. 2 LPE);
- les modalités d'évaluation de l'effet sur les biens à protéger et les seuils d'intervention sont les mêmes pour tous les sites pollués, conformément au principe d'égalité de traitement.

L'ordonnance du 26 août 1998 sur les sites contaminés, OSites; RS 814.680) définit les conditions d'application de l'art. 32c LPE, qui vise à ce que les sites pollués qui le nécessitent soient assainis. Elle règle les modalités de traitement des sites pollués selon une procédure par étapes.

Le besoin de surveillance ou d'assainissement est déterminé par la menace que constitue le site pollué pour les biens à protéger. Pour les eaux, il dépend de l'importance des émissions de substances dangereuses du site pollué, ainsi que des immissions dans ce bien à protéger. Cette importance est appréciée par comparaison de concentrations mesurées de polluants en des points d'observation ciblés à des valeurs limites d'intervention (Explications relatives à l'ordonnance sur l'assainissement des sites pollués par des déchets [ordonnance sur les sites contaminés], OFEFP, mai 1997).

En ce qui concerne les eaux souterraines, l'objectif général est de garantir qu'aucune substance polluante ou que seules des quantités minimales s'échappent du site pollué, sans mettre en danger la qualité des eaux, et donc leur

utilisation comme eau potable, au-delà d'une zone restreinte autour du site (art. 9 OSites).

- Les lixiviats des matériaux du sous-sol pollué ne doivent pas dépasser les valeurs de concentration de l'annexe 1 OSites, qui se fondent en grande partie sur les valeurs maximales de potabilité de l'eau (OPBD²) (art. 9, al. 1, let. a, OSites).
- Les concentrations mesurées dans les eaux en aval du site, dans le secteur qualifié d'aval à proximité, ne doivent pas dépasser un certain pourcentage des valeurs de concentration fixé selon le secteur de protection des eaux (art. 9, al. 1, let. b et c, et art. 9, al. 2, let. b et c, OSites).
- Aucune substance provenant du site ne doit être mesurée dans des concentrations dépassant le seuil de quantification dans un captage d'eau à usage public (art. 9, al. 2, let. a, OSites).

L'OSites part donc du principe qu'aucune mesure particulière n'est nécessaire lorsque le lixiviat provenant du site est potable (à savoir qu'il respecte les valeurs des exigences fixées par l'OPBD pour l'eau potable, respectivement les valeurs de concentration visées à l'annexe 1 OSites) et que les concentrations mesurées en aval à proximité du site sont très faibles (< 10% à 40% des valeurs OSites selon le secteur de protection des eaux souterraines). En cas de dépassement de ces valeurs, des mesures (surveillance et/ou assainissement) sont requises pour préserver la potabilité des eaux, notamment dans les captages d'eau souterraine d'intérêt public et en secteur Au de protection des eaux. Un assainissement est également nécessaire si des substances polluantes s'échappent du site (> 10% voire 40% d'une valeur de concentration en aval immédiat, selon le secteur de protection des eaux) ou si des valeurs de concentration sont dépassées dans le lixiviat et que les capacités de rétention ou de dégradation des substances polluantes sont insuffisantes. Une telle mesure peut donc être également requise, même si jusqu'à présent aucun dépassement des

2 Ordonnance du DFI sur l'eau potable et l'eau des installations de baignade et de douche accessibles au public du 16 décembre 2016 (OPBD; RS 817.022.11)

seuils en aval à proximité du site n'a été constaté (art. 9, al. 2, let. d, OSites).

L'annexe 2, ch. 22, de l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux)³ fixe des exigences chiffrées pour l'eau du sous-sol utilisée comme eau potable ou destinée à l'être. Ces valeurs ont été reprises et complétées par d'autres paramètres dans la liste des «valeurs indicatives pour la qualité des eaux souterraines» des «Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines», OFEFP 2004⁴. Dans la suite du texte, on ne parlera que des «valeurs indicatives», en y incluant aussi les exigences de l'OEaux.

3 Ordonnance du 28 octobre 1998 sur la protection des eaux (OEaux); RS 814.201

4 Aide à l'exécution OFEV VU-2508-F, 2004, valeurs indicatives dans l'Annexe A1.

3 Les problèmes posés par l'application de l'OSites en milieu karstique

3.1 Le transport des polluants en milieu karstique

Les conditions d'écoulement des eaux souterraines et de transport des substances chimiques dans les systèmes aquifères karstiques sont très différentes de celles observées dans les milieux poreux.

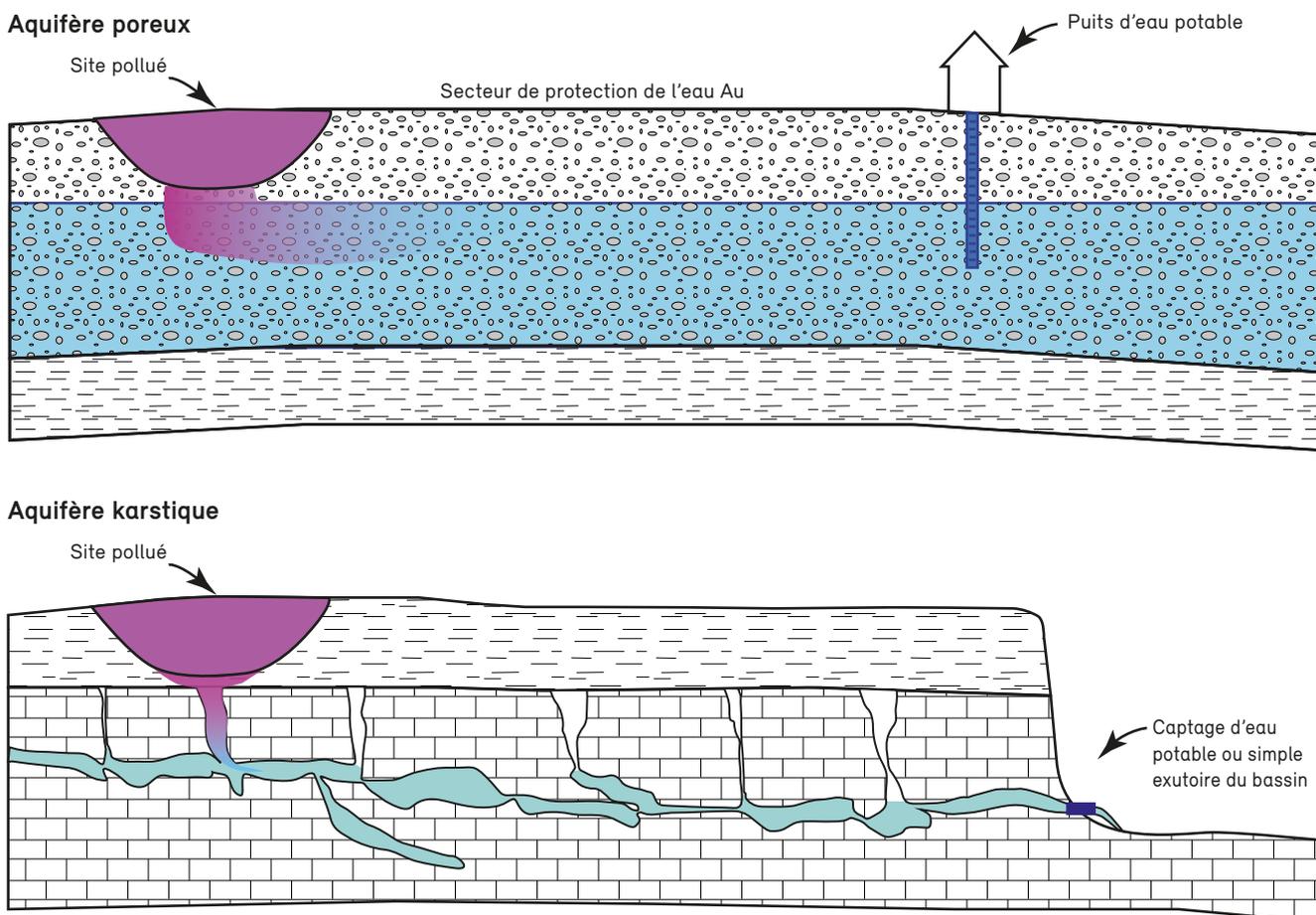
De manière schématique, les eaux s'écoulent par les interstices de la roche en milieu poreux, à une vitesse relativement lente (jusqu'à plusieurs mètres/jour). À l'opposé, les eaux circulent principalement à travers

un réseau constitué de fissures et de conduits dans les aquifères karstiques, à des vitesses pouvant être extrêmement rapides (quelques dizaines, voire centaines de mètres/heure) (figure 1). D'un autre côté, un flux minimal d'eau souterraine est généré par des petites fissures et des pores dans la roche qui peuvent en même temps stocker des quantités non négligeables de polluants.

Les substances chimiques émises par un site pollué en milieu karstique peuvent être ainsi véhiculées sur de grandes distances en très peu de temps, à plusieurs kilomètres du foyer de pollution. Les substances polluantes

Figure 1

Représentation schématique des conditions d'écoulement des eaux souterraines en milieu poreux (en haut) et en milieu karstique (en bas).



dissoutes ou sous forme colloïdale sont transportées principalement à la même vitesse que l'eau. Le transport de produits organiques en phase, plus denses que l'eau, comme par exemple les hydrocarbures chlorés, est quant à lui davantage guidé par la géométrie du réseau karstique. Ceci induit des zones de stockage de la pollution dans les points bas du réseau, pouvant être remobilisée ultérieurement sous l'effet de fortes pluies.

3.2 Des pollutions à l'échelle du bassin d'alimentation

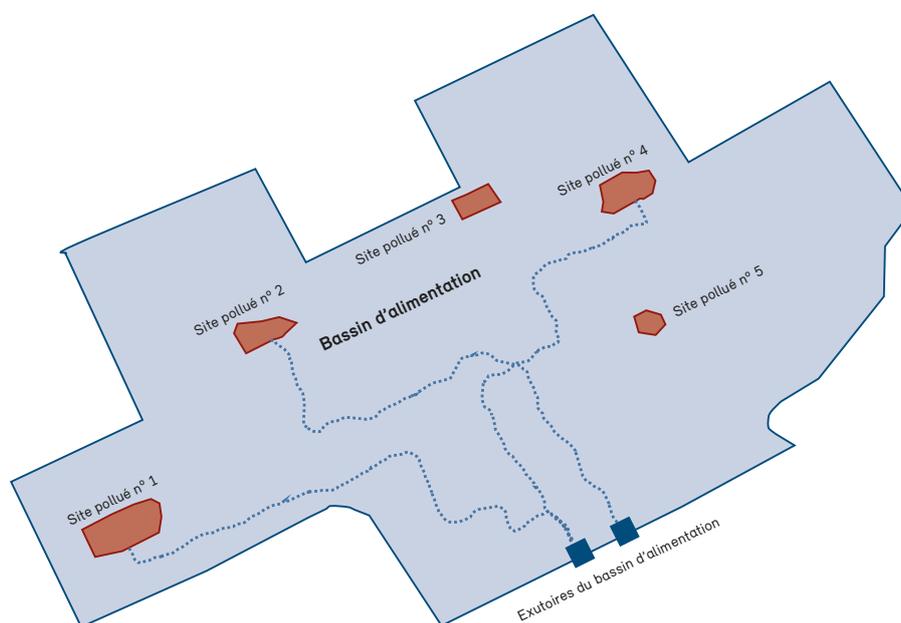
Les eaux infiltrées dans le bassin d'alimentation karstique émergent du système par des sources et des exutoires karstiques. Elles peuvent également rejoindre un aquifère poreux. Les sources karstiques sont captées ou pourraient l'être pour l'alimentation en eau. Les substances chimiques issues de sites pollués peuvent être transportées jusqu'à elles.

Les concentrations en substances polluantes qui peuvent être décelées dans les sources karstiques sont parfois très faibles en raison d'un important effet de dilution, parfois très élevées ou fluctuantes sous l'effet de variations des conditions météorologiques et hydrologiques. Elles sont donc très variables, et par là très difficiles à détecter. De plus, lorsque plusieurs sites pollués se trouvent dans un même bassin d'alimentation, il peut être difficile de définir l'origine de la pollution constatée dans les sources karstiques, car chaque site peut y avoir contribué dès lors qu'il est connecté hydrauliquement avec la source karstique par le réseau de fissures, de conduits et de cavités traversant la roche calcaire (figure 2).

Les sources karstiques qui se déversent dans un aquifère poreux ne sont pas localisables, et on peut en outre partir du principe que leurs eaux se mélangent rapidement et fortement avec l'eau de l'aquifère et entraînent ainsi une dilution des polluants éventuels.

Figure 2

Les sites pollués en connexion hydraulique avec des sources karstiques du bassin d'alimentation karstique peuvent contribuer à leur pollution (dans le cas présent, les sites 1, 2 et 4 contribuent à la pollution des sources karstiques, contrairement aux sites 3 et 5).



3.3 Prélèvement d'eau souterraine en aval immédiat du site

L'OSites permet d'évaluer le besoin de surveillance ainsi que le besoin d'assainissement en prélevant des échantillons d'eau souterraine en aval à proximité du site pollué (art. 9, al. 1, let. b et al. 1, let. c et art. 9, al. 2, let. b et al. 2, let. c, OSites). Mais l'aval à proximité du site, tel que défini pour les milieux aquifères poreux, comme la zone où «les concentrations en substances provenant du site sont encore à peine diluées», ne convient généralement pas aux milieux karstiques.

De manière générale, les substances émises par un site pollué s'écoulent verticalement dans la zone non saturée jusqu'au niveau saturé des eaux souterraines, où elles migrent sous forme dissoute, colloïdale ou liée à des particules dans le sens d'écoulement des eaux. En milieu poreux, la composante horizontale de l'écoulement et du transport des substances chimiques est majoritaire; l'écoulement des eaux s'effectue selon un front relativement régulier et les vitesses de circulation sont lentes.

En milieu karstique, les eaux circulent de manière préférentielle dans le réseau de conduits karstiques, à des vitesses qui peuvent être très rapides, sans que la composante horizontale de l'écoulement soit forcément majoritaire. Le niveau des eaux souterraines peut également être très profond. L'échantillonnage des eaux souterraines à la distance fournie par le calcul empirique de l'aval à proximité⁵ peut dans ce cas être impossible (pas d'eau souterraine à cette distance, sauf à très grande profondeur, à des coûts excessifs de forage), ou bien ne pas être représentatif de l'état de pollution des eaux souterraines à proximité du site (concentrations élevées si le forage traverse une fracture en connexion hydraulique directe avec le foyer de pollution, concentrations faibles sinon).

3.4 Analyse d'eau souterraine d'une source captée en aval du site

Un site nécessite un assainissement dès qu'on constate dans un captage d'eau souterraine à usage public la présence, dans des concentrations dépassant le seuil de quantification, de substances provenant du site susceptibles de polluer les eaux (art. 9, al. 2, let. a, OSites). Dans un contexte karstique, la difficulté tient essentiellement aux fluctuations des apports en substances polluantes et à leur dilution au niveau du captage ou de la source.

4 Démarche pour évaluer les atteintes à l'eau souterraine

La démarche proposée ci-dessous est à mettre en œuvre lorsque la démarche classique de l'OSites se révèle inapplicable, parce qu'il est impossible d'échantillonner l'eau à l'aval à proximité du site. Elle s'applique à des bassins d'alimentation karstiques dans lesquels au moins un site pollué est recensé dans le cadastre comme « site pollué nécessitant une investigation ».

La démarche a été élaborée en partant du constat que les sources karstiques des bassins d'alimentation constituent en général des points d'observation privilégiés de la qualité des eaux en milieu karstique. La détection de substances chimiques au niveau des sources karstiques témoigne de l'existence de foyers de pollution dans le bassin d'alimentation, et d'une capacité de rétention et de dégradation insuffisante des substances par le milieu souterrain.

La démarche est à appliquer au stade de l'investigation préalable au sens de l'OSites.

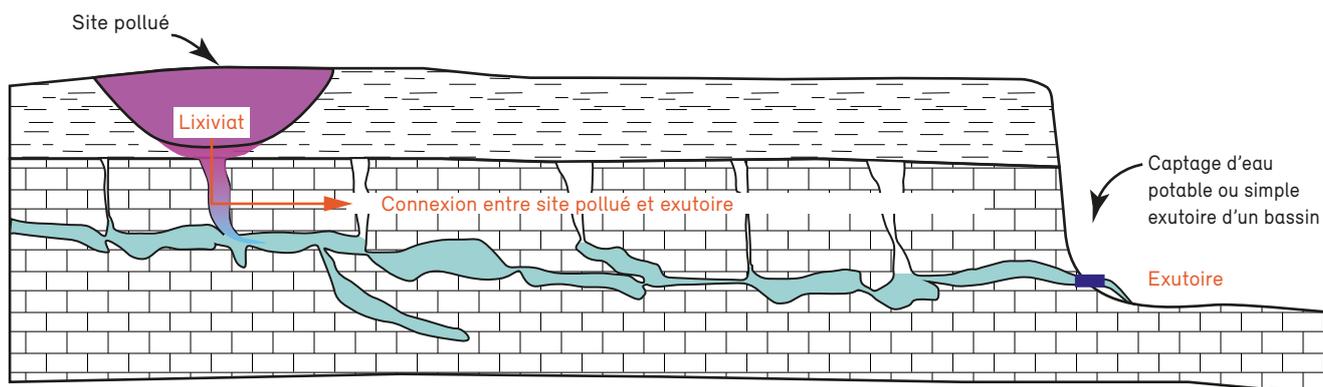
4.1 Les éléments d'évaluation

La démarche se base sur trois éléments d'évaluation (figure 3) :

- L'analyse ou l'évaluation des concentrations en polluants dans le lixiviat afin d'estimer le potentiel de pollution du site. Dans la suite du texte, le terme « potentiel de pollution » se réfère à l'eau de percolation ou au lixiviat qui peut aboutir dans le milieu karstique. Le lixiviat est obtenu par des tests de lixiviation réalisés sur des matériaux solides prélevés dans le foyer de pollution ou par une méthode appropriée pour l'évaluation des concentrations en polluants dans le lixiviat.
- Les connexions hydrauliques existant entre le site pollué et la ou les sources karstiques.
- L'analyse des concentrations en polluants dans des échantillons d'eau prélevés dans les sources karstiques des bassins d'alimentation.

Figure 3

Représentation schématique des trois éléments de base de la démarche d'évaluation des besoins de surveillance et assainissement des sites pollués en milieu karstique (polluants dans le lixiviat du site, connexion entre site pollué et exutoire, polluants au captage d'eau potable ou à l'exutoire).



Les éléments d'évaluation sont en principe mis en œuvre de manière échelonnée, dans l'ordre chronologique fixé par l'autorité d'exécution et le bureau spécialisé. Des évaluations intermédiaires permettent de s'assurer que les connaissances nouvellement acquises sont prises en compte dans la suite des investigations.

Si un site pollué se trouve dans le bassin d'alimentation hydrogéologique d'une source karstique (cf. ch. 5.2), il y a une très grande probabilité qu'il existe une connexion hydraulique entre les deux éléments. Pour la poursuite des investigations et de l'évaluation, l'autorité d'exécution peut donc partir du principe que cette connexion est démontrée. Seules les deux conditions suivantes sont alors requises pour évaluer le site ou les sites dans le bassin d'alimentation d'une ou de plusieurs sources karstiques :

- Le potentiel de pollution du site et ses émissions peuvent être caractérisés à partir de lixiviats ou d'une estimation fiable des concentrations de polluants dans les lixiviats. Lors de cette évaluation du potentiel de pollution et des émissions, il faut aussi tenir compte en particulier de l'épaisseur de la couche de couverture, et donc de sa capacité de rétention et de dégradation des substances polluantes.
- Les immissions dans l'eau souterraine peuvent être appréciées à partir des sources karstiques en aval du site et sont attribuables à un ou différents sites pollués.

La démarche se fonde sur deux ordonnances :

- L'OSites, avec l'application des art. 8 et 9 sur l'appréciation des besoins de surveillance et d'assainissement par rapport aux eaux souterraines en tant que bien à protéger ;
- L'OEaux, avec l'application de l'art. 47 sur la marche à suivre par l'autorité en cas de pollution des eaux.

La démarche fait appel aux valeurs de référence suivantes :

- Comparaison des concentrations mesurées ou estimées dans les lixiviats aux valeurs de l'annexe 1 OSites ;

- Comparaison des concentrations mesurées dans les sources karstiques aux seuils de quantification selon l'état de la technique d'analyse⁶ ;
- Comparaison des concentrations mesurées dans les sources karstiques aux exigences numériques de l'annexe 2, ch. 22, al. 2, OEaux. Ces concentrations sont reprises dans les valeurs indicatives des « Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines ». Dans la suite du texte, on les englobe dans la définition de « valeurs indicatives » ;
- Comparaison des concentrations mesurées dans les sources karstiques aux valeurs indicatives des « Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines ». Un dépassement de ces valeurs constitue un indice d'une pollution d'origine anthropique des eaux souterraines contraire aux prescriptions.

La démarche fait la distinction entre deux situations :

- La source karstique est destinée à un usage d'eau potable dans l'intérêt public, on parle alors de « captage d'eau potable d'intérêt public » dans la suite du texte ;
- La source karstique n'a pas d'usage d'eau potable dans l'intérêt public, on parle alors de « captage d'intérêt privé ou source non captée ».

4.2 Évaluation des sites pollués en connexion hydraulique avec un captage d'eau potable d'intérêt public ou un périmètre de protection des eaux souterraines

L'évaluation de sites pollués connectés hydrauliquement avec des captages d'eau karstique utilisés pour l'alimentation en eau potable dans l'intérêt public ou de sources karstiques se trouvant dans un périmètre de protection des eaux souterraines en aval hydraulique des sites est identique à celle appliquée en milieu poreux. Le tableau 1 présente les différentes situations qu'il est possible de rencontrer lors de l'évaluation.

Lorsque le captage d'eau karstique est d'intérêt public, l'art. 9, al. 2, let. a, OSites s'applique : le site pollué

⁶ Voir également l'aide à l'exécution « Méthodes d'analyse dans le domaine des déchets et des sites pollués ».

nécessite un assainissement si, dans l'eau de ce captage, on constate la présence, dans des concentrations dépassant le seuil de quantification, de substances polluantes provenant de façon certaine de ce site. Des analyses du lixiviat ne sont dans ce cas pas forcément nécessaires (situation 1).

Les sites se trouvant dans le bassin d'alimentation d'un captage d'intérêt public dans lequel on ne mesure aucun polluant, mais dont les concentrations dans les lixiviats dépassent les valeurs de concentration de l'annexe 1 OSites, doivent être surveillés en application de l'art. 9, al. 1, let. a, OSites (situation 2). Comme le site lui-même ne peut pas être surveillé, les mesures de surveillance doivent se concentrer sur le captage d'eau karstique.

Tous les sites pour lesquels aucun polluant n'est mesuré dans un captage d'intérêt public situé en aval et les teneurs dans les lixiviats ne dépassent pas les valeurs de l'annexe 1 OSites sont à classer conformément à l'art. 8 OSites comme sites qui ne nécessitent ni surveillance, ni assainissement (situation 3).

4.3 Évaluation des sites pollués en amont d'un captage d'intérêt privé ou d'une source non captée

Les captages privés et les sources karstiques non captées servent déjà ou pourraient servir ultérieurement à l'alimentation en eau. En raison de la situation hydrologique généralement instable des milieux karstiques, les quantités d'eau et leurs fluctuations ne sont pas prises en considération dans l'évaluation ci-après, car on part du principe que l'eau des sources karstiques doit être exploitable et potable dans toutes les situations.

L'évaluation des sites pollués qui se trouvent en amont d'un captage d'intérêt privé ou d'une source non captée se base d'une part sur les seuils de quantification analytiques et d'autre part sur les valeurs indicatives des instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines. Comme pour les sites en milieux poreux, les valeurs de concentration de l'annexe 1 OSites servent à évaluer les lixiviats du site.

Tableau 1

Évaluation du besoin d'assainissement et de surveillance pour un site pollué dans un bassin d'alimentation karstique d'un captage d'eau potable d'intérêt public ou d'une source karstique se trouvant dans un périmètre de protection des eaux souterraines.

Situation	Site pollué	Captage d'eau potable d'intérêt public/périmètre de protection des eaux souterraines	Évaluation du site	Bases légales
Situation 1	Analyse du lixiviat pas nécessaire	Valeurs > SQ Substances polluantes provenant du site	Site à assainir	OSites art. 9, al. 2, let. a
Situation 2	Lixiv. > Annexe 1 OSites	Valeurs < SQ	Site à surveiller Surveillance de la source karstique selon OSites	OSites art. 9, al. 1, let. a
Situation 3	Lixiv. < Annexe 1 OSites	Valeurs < SQ	Site qui ne nécessite ni surveillance ni assainissement	OSites art. 8

Le tableau 2 présente les différentes situations qu'il est possible de rencontrer lors de l'évaluation d'un site pollué situé en amont d'un captage d'intérêt privé ou d'une source non captée.

Il y a un besoin d'assainissement dès que les lixiviats du site dépassent les valeurs de concentration de l'OSites et qu'il y a simultanément un dépassement des valeurs indicatives dans un captage d'eau karstique d'intérêt privé ou dans une source non captée situé en aval (situation 1 représentée dans le tableau 2). Le dépassement des valeurs indicatives est la preuve d'un danger concret de pollution des eaux souterraines en raison d'une rétention ou d'une dégradation insuffisante des substances polluantes provenant du site.

L'estimation de la mise en danger⁷ est requise pour juger si le site doit être assaini ou seulement surveillé dans les cas où il y a à la fois des dépassements des valeurs de concentration OSites dans le lixiviat et des teneurs comprises entre les seuils de quantification et les valeurs indicatives dans une source karstique en aval (situation 2). La même nécessité vaut pour un site dont le lixiviat ne

dépasse pas les valeurs de concentration OSites, mais qui engendre un dépassement des valeurs indicatives dans une source karstique située en aval (situation 3).

Une surveillance est nécessaire pour les sites dont le lixiviat dépasse les valeurs de concentration OSites et où la source karstique montre des teneurs en polluants inférieures au seuil de quantification (situation 4). Comme le site lui-même ne peut pas être surveillé, les mesures de surveillance doivent se limiter à la ou aux sources. Comme la surveillance est requise uniquement en raison des teneurs en polluants dans les lixiviats, tous les captages/toutes les sources du bassin d'alimentation hydraulique (cf. point 5.2) doivent être surveillés.

Quand on constate à la fois que les teneurs dans le lixiviat sont inférieures aux valeurs de concentration OSites et que les concentrations mesurées dans la ou les sources karstiques sont inférieures aux valeurs indicatives correspondantes, alors le site peut être classé comme site ne nécessitant ni surveillance ni assainissement (situation 5).

⁷ Évaluation du danger par rapport au potentiel de pollution et de dissémination ainsi qu'aux atteintes possibles aux biens à protéger.

Tableau 2

Évaluation du besoin d'assainissement et de surveillance pour un site pollué dans un bassin d'alimentation karstique dont la source n'est pas exploitée pour un usage public.

Situation	Site pollué	Source karstique	Évaluation du site	Bases légales
Situation 1	Lixiv. > Annexe 1 OSites	Valeurs > VI	Site à assainir	OSites art. 9, al. 2, let. d
Situation 2	Lixiv. > Annexe 1 OSites	Valeurs > SQ et < VI	Estimation de la mise en danger (surveillance ou assainissement)	OSites art. 8 et 9
Situation 3	Lixiv. < Annexe 1 OSites	Valeurs > VI	Estimation de la mise en danger (surveillance ou assainissement)	OSites art. 8 et 9
Situation 4	Lixiv. > Annexe 1 OSites	Valeurs < SQ	Site à surveiller Surveillance de la source karstique selon OSites	OSites art. 9, al. 1, let. a
Situation 5	Lixiv. < Annexe 1 OSites	Valeurs < VI	Site qui ne nécessite ni surveillance ni assainissement	OSites art. 8.

4.4 Suite de la procédure

Une fois que le besoin d'assainissement ou de surveillance pour le site investigué est éclairci dans le cadre de l'investigation préalable, on a soit :

- un site à assainir qui nécessite une investigation de détail. Si les résultats de l'investigation de détail divergent fortement de ceux de l'investigation préalable, l'autorité réexamine si le site doit être assaini ou non (art. 14, al. 2, OSites). Dans le cadre de l'élaboration du projet d'assainissement, il s'agit de déterminer les mesures appropriées en s'appuyant sur l'étude des variantes, et de fixer les mesures à prendre conformément à l'art. 18 OSites. Étant donné que les assainissements en milieu karstique sont particulièrement difficiles, une attention particulière doit être portée à la proportionnalité des mesures demandées, et à l'examen de la nécessité de s'écarter du but fixé, conformément à l'art. 15, al. 2 et 3, OSites ;
- un site à surveiller. La surveillance se focalise sur la ou les sources karstiques et tient compte de l'art. 9, al 1^{bis}, OSites, ainsi que des caractéristiques du site et de l'évolution des concentrations des polluants au cours du temps pour définir quand la surveillance peut cesser (voir l'aide à l'exécution « Surveillance des sites pollués »⁸) ;
- un site qui ne nécessite ni une surveillance ni un assainissement. Le site ne nécessite pas de mesures selon l'OSites.

5 Mesures d'investigation et de surveillance spécifiques

Il convient de rappeler ici que les détails techniques relatifs aux investigations et à la surveillance des sites pollués et des sources karstiques, dont les principes sont grossièrement esquissés ci-dessous, figurent dans le rapport d'experts « Moyens d'investigation des sites pollués en milieu karstique » publié sur le site Internet de l'OFEV. Par ailleurs, la pratique permettra d'affiner les méthodes au cours des prochaines années.

5.1 Analyses des sources karstiques

Les concentrations en substances polluantes qui sont mesurées dans les sources des bassins d'alimentation karstiques peuvent fortement fluctuer dans le temps.

Les valeurs qui sont comparées aux limites de quantification, aux exigences numériques de l'OEaux et aux valeurs indicatives des instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines, doivent donc être représentatives des différents contextes hydrologiques.

Différentes techniques de prélèvement peuvent être utilisées pour déterminer les concentrations décisives. Parmi celles-ci les prélèvements ponctuels, tels que classiquement réalisés en milieu poreux, fournissent une information incomplète sur l'état de pollution des eaux, puisqu'ils ne rendent compte du niveau de contamination de la source karstique qu'à un instant donné. Afin de pouvoir apprécier correctement la qualité des eaux, il est donc nécessaire de faire plusieurs campagnes d'échantillonnage et d'analyse dans différents contextes hydrologiques, notamment en périodes de basses et de hautes eaux. Pour que les résultats soient suffisamment fiables, il est indispensable que l'expert convienne avec l'autorité d'exécution du cahier des charges relatif aux prélèvements des échantillons d'eau et aux analyses.

En complément des prélèvements individuels, il est possible d'utiliser des capteurs passifs intégratifs pour échantillonner les sources karstiques. Ces capteurs permettent en effet de

renseigner sur l'état de pollution des eaux sur une période de plusieurs semaines, en fournissant une « moyenne » des concentrations sur la période. Ils permettent ainsi d'intégrer des apports fluctuants en substances polluantes sur la période d'exposition, par accumulation progressive des polluants sur un matériau absorbant.

Dans les captages d'intérêt public, c'est la limite de quantification qui doit être considérée. Dans chaque échantillon de ces sources, aucune substance provenant du site susceptible de polluer les eaux ne devrait être décelable.

Dans les captages d'intérêt privé ou des sources non captées, ce sont les médianes des résultats des analyses des eaux souterraines obtenus au fil du temps qui sont comparées aux valeurs indicatives, et non les valeurs prises isolément.

Une comparaison avec des sources qui ne sont pas influencées par le site permet d'identifier les pollutions géogènes et ubiquitaires.

Si un site nécessite une surveillance, les mesures se limitent à la surveillance de la ou des sources karstiques par les moyens décrits dessus.

5.2 Connexion hydraulique entre le site pollué et la source karstique

Pour pouvoir identifier le bassin d'alimentation d'une source karstique, il faut avoir de bonnes connaissances régionales du contexte géologique et hydrogéologique de la source. Les modélisations géologiques et hydrogéologiques (cf. rapport d'experts « Moyens d'investigation des sites pollués en milieu karstique » de la série Connaissance de l'environnement) permettent de définir avec une précision suffisante le bassin d'alimentation hydrogéologique d'une source. Comme souligné dans le point 4.1, en s'appuyant sur cette base, on peut partir du principe que les sites présents dans le bassin d'alimentation d'une source

karstique sont connectés à celle-ci. En cas de doute, des investigations complémentaires telles que des essais de traçage ou des analyses de signature chimique (p. ex. par l'analyse isotopique) peuvent confirmer la position du site à l'intérieur du bassin d'alimentation hydrogéologique et donc la connexion hydraulique avec la source.

En ce qui concerne la connexion hydraulique, il faut aussi tenir compte des aides à l'exécution et des guides pratiques ainsi que des examens en rapport avec la délimitation des zones de protection dans les milieux karstiques (guide pratique «Cartographie de la vulnérabilité en régions karstiques [EPIK]» et «Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines»).

5.3 Analyses du lixiviat de matériaux solides ou d'eau de percolation

Le besoin de surveillance d'un site pollué peut être évalué à partir des concentrations en polluants détectées dans un lixiviat des matériaux pollués du sous-sol (art. 9, al. 1, let. a). Au total, trois méthodes sont admises par les autorités pour évaluer les concentrations en polluants dans les lixiviats :

- le prélèvement de matériaux du sous-sol contaminés pour la réalisation d'un essai de lixiviation en colonne⁹ au laboratoire,
- le prélèvement de matériaux du sous-sol contaminés et leur analyse directe au laboratoire, suivi d'un calcul à l'équilibre des concentrations dans la phase aqueuse du terrain (assimilée à un lixiviat),
- le prélèvement direct d'eaux de percolation du site et leur analyse au laboratoire ; cette méthode est adaptée aux décharges dont certaines sont équipées de drains.

Néanmoins, l'essai de lixiviation en colonne est souvent peu adapté aux matériaux consolidés, en particulier lorsqu'un site industriel se trouve immédiatement sur des calcaires karstiques. L'excavation de matériaux contaminés du site pollué peut également s'avérer très difficile, voire impossible, car le foyer de pollution peut avoir migré en profondeur à la faveur du réseau de fissures et cavités karstiques.

Dans les cas où il est impossible d'échantillonner de manière représentative le sous-sol pollué du site, ou les

eaux de percolation, on doit appuyer l'estimation des émissions sur une évaluation, d'une part, de la situation hydrogéologique selon les connaissances générales disponibles et, d'autre part, des quantités présumées de polluants sur le site, en se basant sur les données de l'investigation historique.

S'il n'existe pas de valeur de concentration selon l'annexe 1 OSites pour des substances pertinentes, l'autorité fixe les valeurs requises au cas par cas en accord avec l'OFEV, selon les prescriptions de la législation sur la protection des eaux (annexe 1, al. 1, OSites).

5.4 Procédure à suivre en présence de plusieurs sites pollués dans le bassin d'alimentation

Lorsqu'une pollution est démontrée dans une source karstique et que plusieurs sites pollués nécessitant des investigations se trouvent dans le bassin d'alimentation, il se pose inévitablement la question de savoir quel site ou quels sites entrent en considération comme foyer(s) de pollution, et quels propriétaires sont tenus de prendre des mesures. Les critères à appliquer sont les suivants :

1. Potentiel de pollution des sites : si un site présente un potentiel de pollution élevé par rapport au polluant détecté dans la source karstique, c'est une indication claire que ce site doit être considéré comme foyer de la pollution.
2. Valeurs de concentration du lixiviat des matières solides des sites : si les foyers de pollution peuvent être échantillonnés, les valeurs de concentration de leurs lixiviats associées au potentiel de pollution fournissent une indication claire sur le potentiel de mobilisation du site.
3. Voie de dissémination de la pollution du site jusqu'à la source karstique : une voie de dissémination courte entre le site ou le foyer de pollution et la source karstique indique la possibilité d'un transport direct des polluants.

Pour identifier les sites responsables de la pollution, on peut également recourir à des méthodes isotopiques ou à d'autres méthodes de signature des pollutions (cf. rapport d'experts «Moyens d'investigation des sites pollués en milieu karstique» de la série Connaissance de l'environnement).

Glossaire

bassin d'alimentation

Zone d'où proviennent les eaux souterraines qui s'écoulent dans un aquifère en direction d'un même exutoire.

captages d'intérêt public

Captages dont l'eau doit respecter les exigences de la législation sur les denrées alimentaires (p.ex. services d'approvisionnement en eau, restaurants, fromageries, etc.).

essai de traçage

Marquage d'une eau au moyen de traceurs artificiels, pour apprécier son cheminement. Les essais de traçage permettent par exemple de mettre des liaisons hydrauliques en évidence, de déterminer la vitesse de déplacement ou le temps de séjour des eaux dans le sous-sol.

estimation de la mise en danger

Évaluation différenciée du danger pour l'environnement basée sur les critères principaux suivants :

1. Potentiel de pollution : quelle est la dangerosité des polluants, quelle en est la quantité ?
2. Potentiel de mobilisation : à quelle vitesse, à quelle distance et en quelles quantités les polluants sont-ils libérés et transportés ?
3. Degré d'exposition et importance des milieux à protéger (eaux, sol, air) : les polluants sont-ils susceptibles d'atteindre des milieux à protéger ? Quels sont les dégâts prévisibles ?

On visualise simultanément ces trois critères en les faisant figurer dans un modèle tridimensionnel. Le volume du « cube » inscrit entre les trois axes représente l'ampleur du danger pour l'environnement.

(Source : www.bafu.admin.ch/potentiel-pollution)

évaluation préliminaire

Évaluation qualitative des sites pollués figurant au cadastre, destinée à vérifier s'ils nécessitent des investigations. Établissement d'une liste de priorités pour les sites nécessitant des investigations.

karst

Type de relief modelé par des phénomènes de dissolution actifs. Par extension, roche comportant des cavités, parfois importantes puisqu'elles peuvent atteindre la taille de cavernes. La karstification touche les roches carbonatées (calcaire, dolomie) et les évaporites (gypse, sel gemme).

lixiviat (selon OSites)

Échantillon aqueux résultant d'un essai de lessivage ou d'extraction réalisé en laboratoire selon l'annexe 1, al. 2, OSites sur un échantillon de matériaux provenant du site pollué. S'il est possible de prélever des échantillons de l'eau de percolation sur des sites à pollution particulièrement hétérogène (p.ex. les sites de stockage définitifs), ces échantillons pourront être considérés comme des lixiviats (cf. annexe 1, al. 3, OSites).

périmètre de protection des eaux souterraines

Régions spécialement délimitées pour protéger les eaux souterraines en vue d'une utilisation future (exploitation ou alimentation artificielle).

potentiel de dissémination

Quantité, vitesse, distance et cheminement caractérisant une éventuelle dissémination de substances dangereuses dans l'environnement. La détermination du potentiel de dissémination requiert des connaissances au sujet de la rétention et de la dégradation des substances, ainsi que des cheminements qu'elles peuvent emprunter (géologie, hydrogéologie, pédologie, etc.).

potentiel de pollution

Type, situation, quantité et concentration des substances dangereuses pour l'environnement présentes dans un site pollué.

Seuil de quantification (SQ)

Concentration minimale pouvant être déterminée au laboratoire avec une précision et une exactitude minimales exigées.

source karstique

Exutoire d'un système karstique.

source karstique privée ou non captée

Source karstique captée à des fins exclusivement privées et source karstique non utilisée (ensemble des sources karstiques à l'exclusion de celles utilisées dans l'intérêt public pour l'approvisionnement en eau potable).

valeurs de concentration

Valeurs d'appréciation des annexes de l'OSites utilisées pour déterminer les mesures requises selon la législation sur les sites contaminés.

valeurs indicatives (VI)

Valeurs proposées correspondant en général aux limites au-delà desquelles il y a lieu de supposer que les eaux souterraines sont polluées. Valeurs selon l'annexe A1 des instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines, OFEFP 2004.