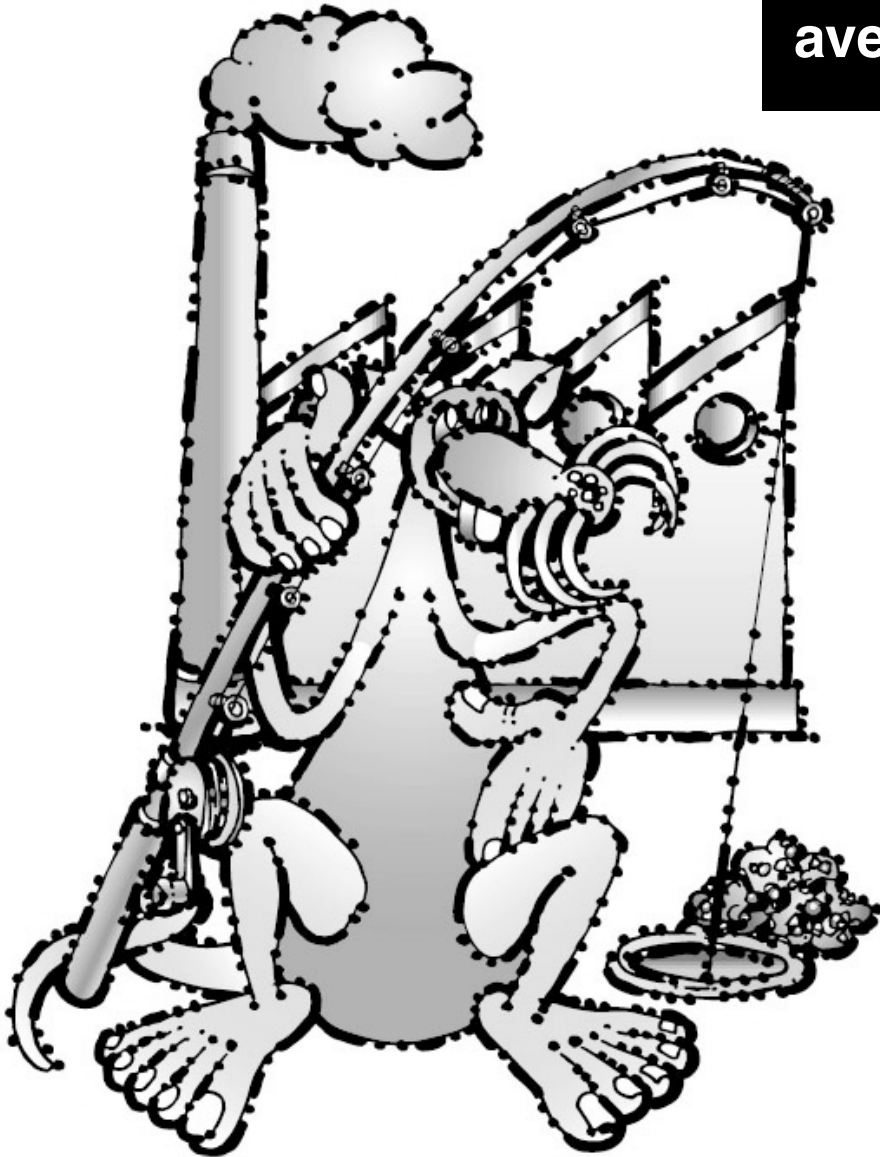


**Sites contaminés  
Estimation de la mise en danger**

**Prélèvements d'eau  
souterraine en relation  
avec les sites pollués**





**Sites contaminés  
Estimation de la mise en danger**

**Prélèvements d'eau  
souterraine en relation  
avec les sites pollués**

**Publié par l'Office fédéral  
de l'environnement, des forêts  
et du paysage OFEFP  
Berne, 2003**

## Valeur juridique de cette publication

*La présente publication est une recommandation élaborée par l'OFEFP en tant qu'autorité de surveillance. Elle s'adresse en premier lieu aux autorités d'exécution. Elle concrétise des notions juridiques indéterminées provenant de lois et d'ordonnances et permet ainsi une application uniforme de la législation. De telles recommandations (appelées aussi directives, instructions, manuels, guides, aides pratiques) paraissent dans la collection « L'environnement pratique / Vollzug Umwelt ».*

*Ces recommandations garantissent l'égalité devant la loi ainsi que la sécurité du droit, tout en favorisant la recherche de solutions adaptées aux cas particuliers. Si l'autorité en tient compte, elle peut partir du principe que ses décisions seront conformes au droit fédéral. D'autres solutions ne sont pas exclues; selon la jurisprudence, il faut cependant prouver leur conformité avec le droit existant.*

## Editeur

Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP)  
*L'OFEFP est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC)*

## Auteurs

*Groupe de travail «Investigation préalable»:*

- B. Bahrig, Arbeitsgemeinschaft Boden- und Grundwasserschutz, D-Konstanz
- M. Brehmer, Service de la protection de l'environnement du canton de Soleure
- H. Burger, Département de la construction du canton d'Argovie
- P. Haldimann, Dr. H. Jäckli AG, Zurich
- P. Huggenberger, Géologue cantonal du canton de Bâle-Ville
- R. Philipp, magma AG, Zurich
- D. Reinker, Ecoswiss, Zurich
- D. Rossel, AB Conseil SA, Orbe
- B. Schmid, BMG Engineering AG, Schlieren  
(représentant de la Société suisse des industries chimiques, SSIC)
- M. von Allmen, Dr. Graf AG, Gerlafingen (représentant de Swissmem)
- U. Ziegler, OFEFP (président)

## Image de couverture

Hans-Peter Imhof, Atelier für Gestaltung Bern

## Commande

Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage  
Documentation, 3003 Berne  
Fax + 41 (0)31 324 02 16, E-mail: docu@buwal.admin.ch  
Internet: www.buwalshop.ch

## Numéro de commande

VU-3413-F

# Table des matières

Résumé .....	5
1 Introduction.....	7
1.1 Généralités .....	7
1.2 Objectifs de l'aide à l'exécution .....	8
1.3 Domaine d'application.....	8
2 Délimitation d'un site pollué .....	9
3 La zone en aval d'un site pollué.....	12
4 La zone en aval à proximité du site.....	15
5 La zone en amont d'un site pollué.....	18
6 Stratégie d'échantillonnage.....	20
6.1 Modèle hydrogéologique de travail .....	20
6.2 Disposition et nombre de points de prélèvement .....	20
6.3 Echantillonnage .....	23
ANNEXE.....	26
Bibliographie complémentaire.....	26
Lois et ordonnances .....	27



## Résumé

Selon la législation sur la protection de l'environnement, l'objectif de l'assainissement des sites contaminés consiste à éliminer les atteintes à l'environnement nuisibles ou incommodantes causées par ces sites et le danger concret de telles atteintes. Les immissions peuvent toucher divers domaines environnementaux, tels le sol, l'air et les eaux superficielles, mais aussi et surtout les eaux souterraines que nous voulons protéger. C'est pourquoi l'ordonnance du 26 août 1998 sur l'assainissement des sites pollués (OSites) définit des critères spécifiques pour l'examen et l'évaluation des atteintes portées aux eaux souterraines par les sites pollués. Afin d'évaluer les immissions qui altèrent actuellement ces eaux, il faut y prélever des échantillons et comparer l'apport en polluants dans la zone située en aval à proximité d'un site avec la qualité de l'eau en amont de ce site.

L'OSites énonce explicitement que, pour évaluer les atteintes émanant d'un site, il faut déterminer la concentration des polluants qui s'en écoulent dans la zone située en aval à proximité de ce site. C'est pourquoi il faut délimiter pour chaque cas la « zone en aval à proximité du site » et choisir la méthode qui sera appliquée pour prélever les échantillons d'eau souterraine à analyser.

La présente aide à l'exécution met à la disposition des autorités d'exécution et des conseillers scientifiques les informations de base nécessaires pour prélever des échantillons représentatifs, permettant de déterminer la concentration des polluants s'écoulant d'un site. Elle définit à cet effet les critères applicables pour délimiter la zone en aval à proximité du site. Elle fournit en outre les bases nécessaires pour décider combien de points de prélèvement il faut prévoir dans les cas concrets, où il faut les placer, et où et quand il y a lieu de prélever des échantillons dans la zone en amont du site.





# 1 Introduction

## 1.1 Généralités

En vertu de l'art. 5, al. 4, let. b, de l'ordonnance du 28 août 1998 sur l'assainissement des sites pollués (ordonnance sur les sites contaminés, OSites), l'autorité détermine les sites pour lesquels il faut procéder à une investigation préalable. Son objectif est d'apprécier les besoins de surveillance et d'assainissement des sites pollués (art. 8 OSites). S'agissant de la protection des eaux souterraines, cette appréciation requiert des investigations sur le site lui-même (danger concret) et dans la plupart des cas des analyses de l'aquifère (danger immédiat):

- un site doit être surveillé lorsque l'on constate, en aval du site, la présence de substances provenant de ce site et susceptibles de polluer les eaux (art. 9, al. 1, let. b, OSites);
- un site doit être assaini si la concentration des substances en provenant dépasse, mesurée en aval à proximité du site, la moitié de la valeur de concentration mentionnée dans l'annexe 1 de l'OSites pour les eaux souterraines exploitables (art. 9, al. 2, let. b, OSites) et le double de cette valeur pour les autres eaux souterraines (art. 9, al. 2, let. c, OSites).

La question se pose donc de savoir ce qu'il faut entendre par « en aval à proximité du site » et comment délimiter la zone concernée. En raison du caractère généralement hétérogène du sous-sol et des eaux souterraines, le choix de points de prélèvement appropriés et le prélèvement d'échantillons d'eau représentatifs requièrent des compétences élevées de la part du conseiller scientifique mandaté pour procéder aux investigations.

Pour savoir si une substance provient du site examiné, on procède généralement à une comparaison de la qualité de l'eau souterraine en amont et en aval du site.

Le groupe de travail « Investigation préalable » de l'OFEFP s'est fixé pour objectif d'élaborer une « caisse à outils » comprenant des aides à l'exécution d'orientation pratique et faciles à mettre en œuvre pour procéder à l'investigation préalable de sites pollués. Cette « caisse à outils » comprend des instructions pratiques, des listes de contrôle et des documents de base permettant d'accomplir des tâches spécifiques en conformité avec les dispositions légales en vigueur. Ces aides à l'exécution visent notamment à augmenter la qualité et l'efficacité des investigations, et par conséquent la rentabilité du traitement des sites contaminés.

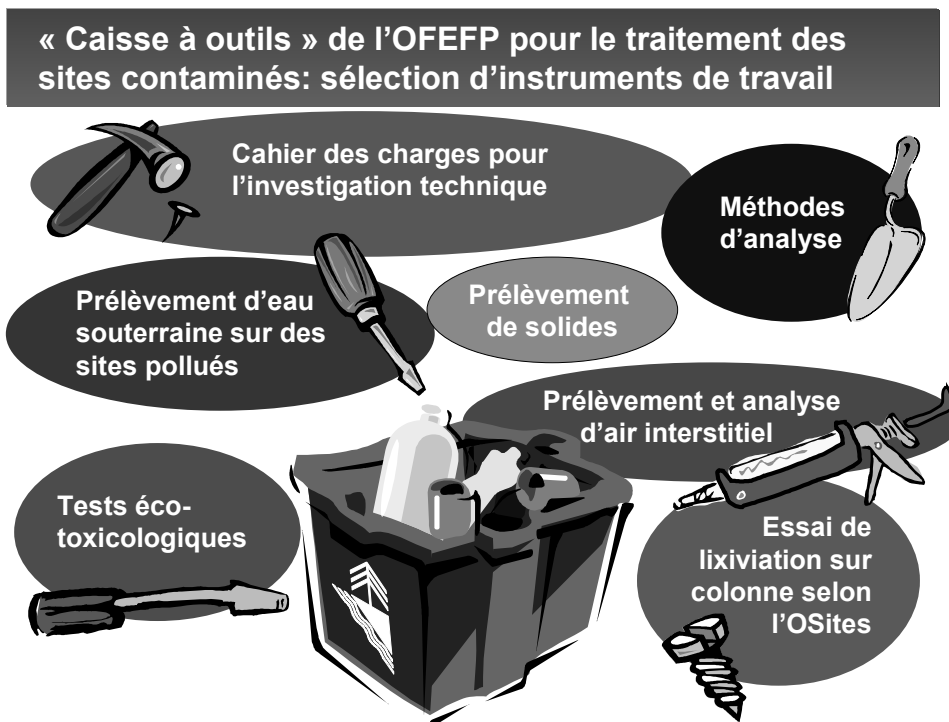


Figure 1: « Caisse à outils » pour le traitement des sites contaminés

## 1.2 Objectifs de l'aide à l'exécution

L'objectif principal de l'aide à l'exécution est de contribuer à ce que les besoins de surveillance et d'assainissement des sites soient appréciés de manière homogène dans toute la Suisse, et de procurer ainsi la sécurité juridique dont nous avons besoin pour traiter les sites contaminés. Visant à déterminer les éléments techniques nécessaires pour établir le danger immédiat qui pèse sur les eaux souterraines voisines d'un site contaminé, elle comprend notamment:

- la définition de la zone en aval du site;
- des critères de délimitation de la « zone en aval à proximité du site »;
- des critères pour fixer les points de prélèvement dans la zone en aval et la zone en amont du site;
- des directives concernant l'échantillonnage.

## 1.3 Domaine d'application

La présente aide à l'exécution a été élaborée pour régler l'échantillonnage d'eau souterraine dans le cadre de l'investigation préalable des sites pollués. C'est pourquoi elle se concentre sur la détermination des points de prélèvement visant à établir les besoins de surveillance et d'assainissement.

Les considérations qu'on y trouve s'appliquent aussi à d'autres domaines inhérents au traitement des sites contaminés, tels l'échantillonnage d'eau souterraine dans le cadre d'une investigation de détail ou de la surveillance d'un aquifère. Mais elle ne traite pas de questions ni d'objectifs propres à ce genre d'investigations.

## 2 Délimitation d'un site pollué

Pour être en mesure de cerner la « zone en aval à proximité d'un site », il faut d'abord délimiter le site lui-même. Les informations retirées de l'investigation historique fournissent généralement une base très utile à cet effet.

Le périmètre des sites pollués est déterminé par la présence et l'extension de la pollution. Ils sont fréquemment inscrits au cadastre en fonction des parcelles concernées. En revanche, les investigations selon l'OSites doivent se concentrer sur les zones effectivement polluées.

Dans les sites de stockage définitif, le pourtour de la pollution correspond généralement au périmètre inscrit au cadastre.

Par contre, dans les aires d'exploitation, il faut souvent subdiviser le périmètre en secteurs affectés par des pollutions différentes en fonction des événements passés, tels qu'activités polluantes, accidents, etc. Il arrive fréquemment que ces secteurs ne puissent être identifiés avec précision qu'au terme de l'investigation historique. Les secteurs dont on a pu déterminer avec certitude qu'ils ne renferment aucune charge polluante ne font pas partie du site pollué proprement dit. Pour des raisons pratiques, il peut donc être judicieux de recenser séparément, à l'intérieur d'un site répertorié au cadastre, les secteurs à problèmes et les foyers de pollution, notamment les « hot spots », dont les émissions dans les eaux souterraines jouent un rôle primordial pour l'évaluation du site.

Principes généraux:

- une parcelle peut comporter plusieurs sites pollués;
- un site pollué peut s'étendre sur plusieurs parcelles.

Pour être en mesure d'évaluer un site, il faut déterminer les secteurs susceptibles de relâcher des polluants, qu'il y aura donc lieu d'examiner. On peut envisager quatre cas de figure (fig. 2.1):

Cas A: l'ensemble du site renferme des charges polluantes; le secteur pollué correspond sensiblement au périmètre du site tel qu'il figure dans le cadastre, indépendamment des limites de parcelles (p. ex. décharge).

Cas B: à l'intérieur d'un site figurant dans le cadastre, on peut distinguer des secteurs dont l'éventail de polluants varie par la nature et la quantité, ou au cours du temps (p. ex. fabrique avec des ateliers de production à risques, lieux d'accident ou entrepôts). Dans un tel site, les réflexions relatives à l'échantillonnage tiendront compte des différences entre les spectres d'émissions.

Cas C: à l'intérieur d'un site figurant dans le cadastre, l'investigation historique révèle par exemple qu'un seul secteur est effectivement pollué (p. ex. un atelier sur un grand parking). Dans ce cas de figure, seule la surface effectivement affectée sera considérée comme un site pollué. Dans un tel site, les réflexions relatives à l'échantillonnage se concentreront sur le secteur pollué.

**Cas D:** il comprend les situations où des substances ont été entraînées hors du site proprement dit, au fil du temps, par un phénomène de transport ou de diffusion, et ont pollué le sous-sol des environs à un tel point qu'il doit également être intégré dans le site pollué (cf. également fig. 2.2). Dans un tel site, les réflexions relatives à l'échantillonnage seront étendues à l'ensemble du périmètre pollué.

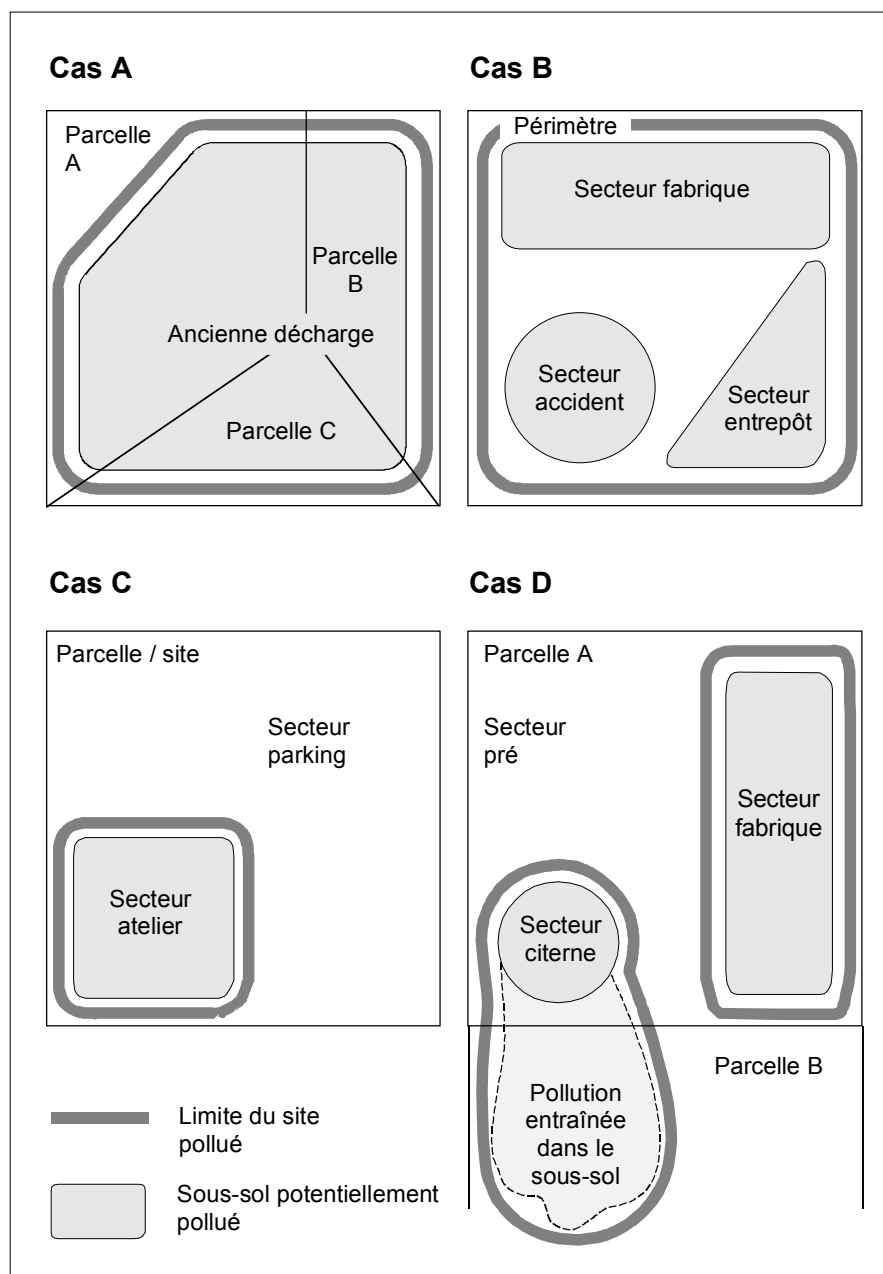


Figure 2.1 Site et secteurs pollués

Lorsqu'un forage implanté dans la zone que l'on supposait « en aval du site » fait apparaître une pollution directement issue du site en question, les investigations (forages, levés géophysiques, mesures du gaz contenu dans le sol) seront répétées jusqu'à ce que l'on puisse délimiter le site pollué et que les points de mesure des eaux souterraines se trouvent sans aucun doute dans la zone en aval du site.

Dès que les limites effectives du site auront été établies, en incluant tous les panaches de pollution qui en sont issus, il conviendra d'adapter les données figurant dans le cadastre.

Les considérations précédentes débouchent sur la conclusion suivante: avant de chercher à circonscrire la zone en aval du site, il faut généralement avoir achevé l'investigation historique, voire entamé l'investigation technique, mais en tout cas avoir résolu le problème de la délimitation du site.

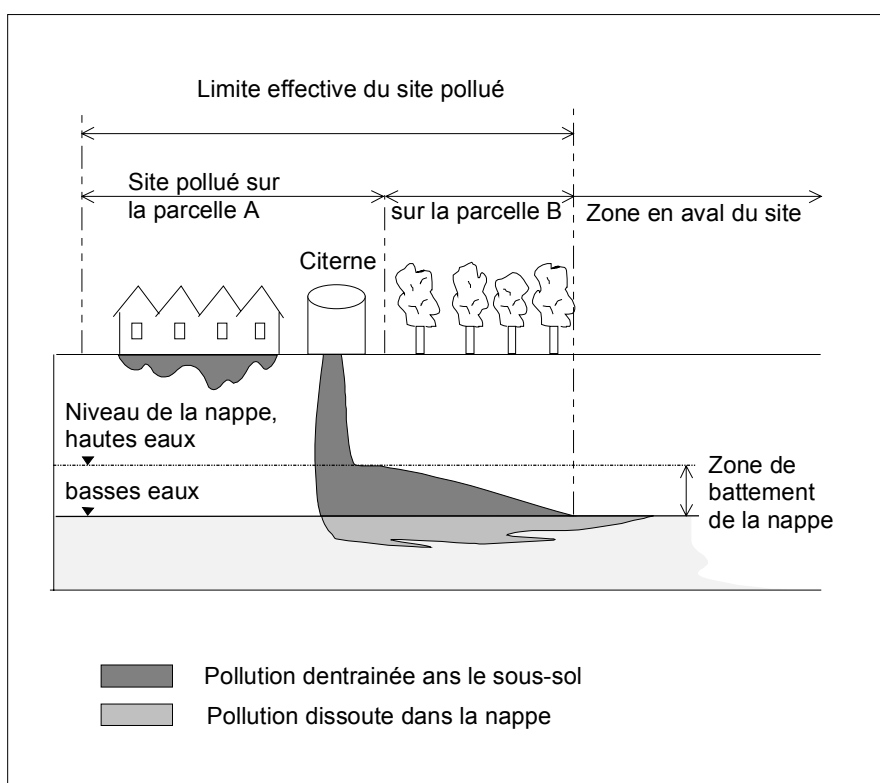


Figure 2.2: Pollutions entraînées

Par ailleurs, un forage effectué en vue de prélever des échantillons d'eau souterraine peut aussi fournir des renseignements aidant à circonscrire un site pollué. Pour cette raison, comme toujours lors du traitement des sites pollués, il est conseillé de procéder par étapes, en utilisant itérativement les résultats de chaque étape d'investigation pour planifier les suivantes.

L'étude historique d'un site peut aussi démontrer qu'il n'y a pas de secteurs à problèmes, qu'il est impossible que des polluants aboutissent dans les eaux souterraines ou que la pollution en question revêt une importance mineure. Si le

conseiller scientifique parvient à exposer clairement cet état de fait dans le cahier des charges, on pourra renoncer aux échantillonnages d'eau souterraine.

### 3 La zone en aval d'un site pollué

**Définition:** par « zone en aval d'un site pollué », on entend la zone où les polluants qui s'échappent du site peuvent se propager dans les eaux souterraines, que ce soit par transport convectif ou par diffusion, advection ou dispersion. Dans un aquifère à porosité homogène et isotrope (conditions idéales), proche du site, cette zone a la forme d'une parabole entourant tout le site, dont l'axe est déterminé par la direction des écoulements souterrains (fig. 3.1).

Au moment de délimiter la zone en aval d'un site, il convient de vérifier si la pollution causée par ce site se cantonne dans la tranche insaturée surmontant le niveau piézométrique ou si elle a franchi ce niveau et atteint la zone saturée. Dans le premier cas, le sommet de la parabole correspond au point le plus en amont du site. Dans le second cas, il faut ajouter en amont une zone d'influence dont l'extension dépend de facteurs hydrogéologiques comme le gradient hydraulique, la dispersion longitudinale et latérale, la profondeur d'immersion, etc.

La **forme de la zone en aval d'un site** est déterminée par les paramètres géométriques et hydrogéologiques suivants:

- la taille du site, notamment sa largeur, mesurée perpendiculairement à la direction des écoulements souterrains;
- l'épaisseur de l'aquifère H;
- le gradient hydraulique de l'aquifère I;
- le coefficient de perméabilité K selon Darcy;
- la porosité efficace n.

A l'aide de ces paramètres, on établit un modèle hydrogéologique conceptuel du site et de la zone en aval de celui-ci. Le conseiller scientifique chargé de la modélisation doit disposer de connaissances approfondies en hydrogéologie et d'une grande expérience en la matière. Les paramètres hydrogéologiques seront soit tirés de précédentes recherches, soit obtenus par extrapolation à partir de zones voisines. L'estimation de ces paramètres n'est admissible que dans les cas simples.

Dans les cas complexes, on commencera par établir ces paramètres en appliquant des méthodes appropriées, telles que mesures de piézomètres agencés en triangle ou levés géophysiques. S'il faut recourir à ce genre de méthodes, il convient de le spécifier dans le cahier des charges relatif aux investigations techniques. Cette démarche, qui consiste à délimiter la zone en aval du site par des forages avant de situer les points de prélèvement dans les eaux souterraines à l'intérieur de ce périmètre, correspond à la procédure par étapes qui s'est avérée efficace dans le traitement des sites contaminés. Le conseiller scientifique a pour tâche de concevoir les étapes de manière à limiter au maximum le nombre d'itérations nécessaires.

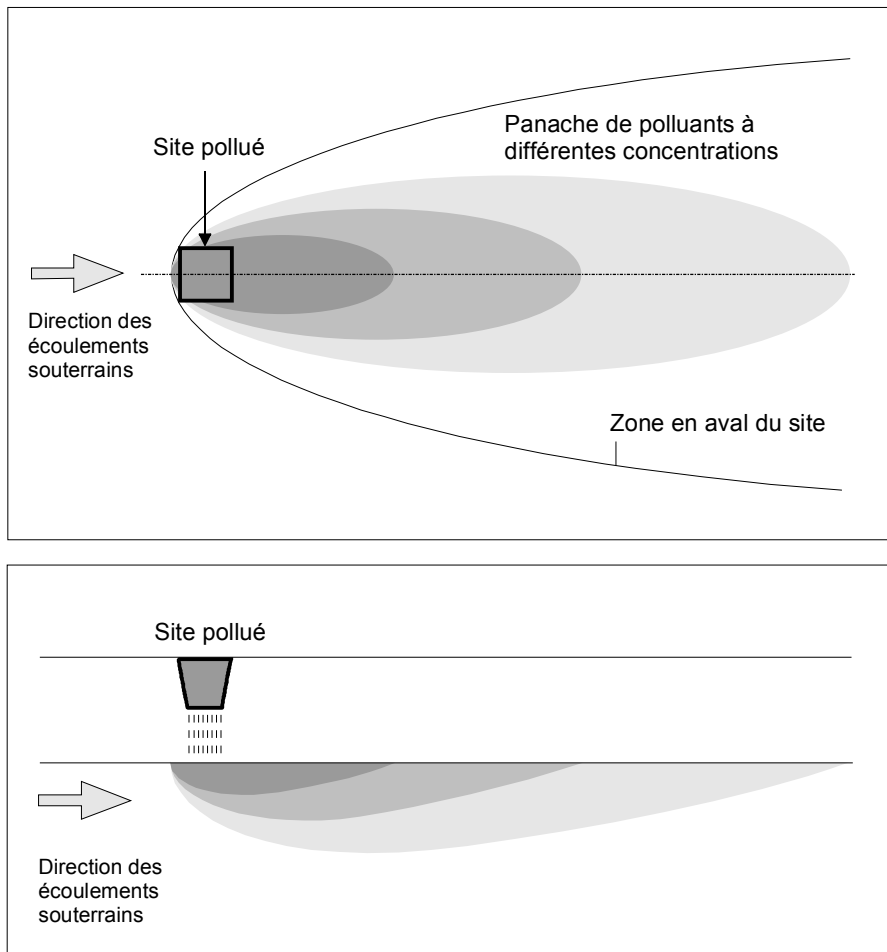


Figure 3.1: Panache de pollution en aval d'un site (dans les conditions idéales d'un aquifère homogène et isotrope)

Le calcul des paramètres dont on aura besoin pour déterminer la zone en aval d'un site exige souvent un travail long et coûteux. C'est pourquoi on peut se contenter de la délimiter approximativement dans les cas simples.

La zone en aval d'un site pollué est d'autant plus *étroite* que:

- le gradient hydraulique de la nappe souterraine (ou la déclivité de la pente) est élevé,
- l'aquifère est homogène,
- sa perméabilité est élevée.

La zone en aval d'un site pollué est d'autant plus *large* que:

- le gradient hydraulique est faible,
- l'aquifère est hétérogène,
- sa perméabilité est faible.

La zone en aval d'un site peut être subdivisée au moyen d'isolignes en zones sensiblement elliptiques de concentrations semblables de substances, que l'on nomme « panaches de pollution ». La forme ellipsoïdale d'axe longitudinal allongé résulte du fait que les substances sont transportées par convection dans les eaux souterraines et que la dispersion est plus marquée dans la direction longitudinale, correspondant au sens de l'écoulement, que dans la direction transver-

sale. La forme de l'ellipse ne dépend pas seulement des paramètres hydrogéologiques, mais aussi des substances transportées, si bien qu'elle diffère d'une substance à l'autre.

La **forme du panache de pollution** dépend également:

- du degré d'hétérogénéité et d'anisotropie de l'aquifère;
- du type et de la quantité de substances provenant du site;
- des interactions entre les diverses substances, le milieu aquifère et la nappe souterraine (p. ex. la solubilité, les effets de sorption, etc.);
- de la forme et de l'extension de la pollution sur le site.

A ce sujet, on distinguera les cas suivants:

- 1) L'aquifère est sensiblement homogène et isotrope (p. ex. gravier homogène). Dans ces conditions idéales, la parabole de la zone en aval du site et les panaches de pollution elliptiques peuvent être évalués à l'aide de modèles mathématiques.
- 2) L'aquifère est hétérogène et anisotrope, si bien que les eaux souterraines suivent des cheminements préférentiels (p. ex. gravier hétérogène et anisotrope, moraine, éboulis de pente, cône de déjection torrentiel, rocher). Dans ces conditions, il est souvent impossible de délimiter numériquement la parabole. Dans le meilleur des cas, la zone en aval du site pourra être circonscrite en exécutant des essais de traçage ou en analysant des isotopes stables. Dans ces cas de figure, on considérera par prudence la zone située en contrebas (au sens des eaux souterraines) d'un site comme une « zone en aval d'un site pollué » sur une grande largeur, qui sera déterminée empiriquement.

Dans les cas complexes, on délimitera l'étendue du panache de pollution avant de déterminer les points de prélèvement, en appliquant des méthodes spéciales. Selon les substances, on recourra par exemple à des méthodes géophysiques ou à des analyses de l'air interstitiel.

En délimitant la zone en aval et le panache de pollution, on prendra toujours en compte le fait que le gradient de l'aquifère et la direction des écoulements souterrains peuvent varier selon le niveau d'eau, par exemple d'une saison à l'autre. L'axe longitudinal de la parabole peut donc fluctuer selon un angle plus ou moins grand. Par prudence, on délimitera la zone en aval de telle manière qu'elle forme une parabole englobant toutes les paraboles possibles à différents niveaux piézométriques.

En règle générale, plus la zone en aval et le panache de pollution sont définis avec précision, plus il est facile de fixer les points de prélèvement et moins il en faut pour obtenir un échantillonnage représentatif (chapitre 6).



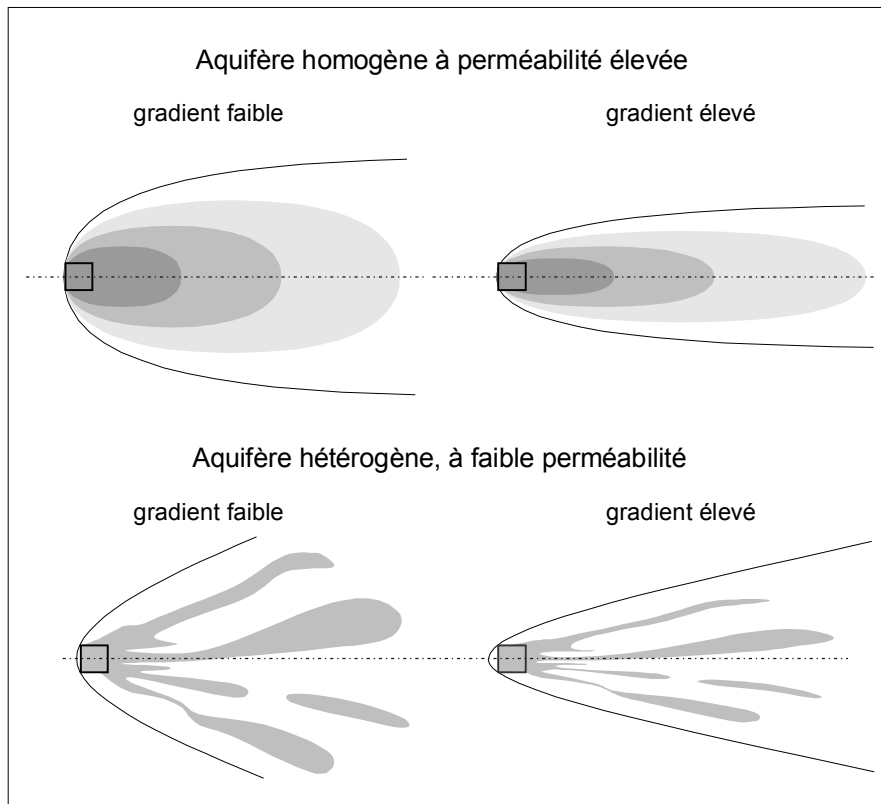


Figure 3.2: Aspects possibles de la zone en aval d'un site pollué et du panache de pollution en émanant

Par contre, si la zone en aval d'un site pollué est très large ou qu'elle ne peut pas être définie avec précision, il faudra davantage de points de prélèvement pour obtenir un échantillonnage représentatif et éviter les erreurs de diagnostic. Cette considération s'applique surtout aux sites qui se trouvent sur des terrains morainiques inclinés, des dépôts fluviaux ou des massifs rocheux aquifères à porosité fissurale ou circulation karstique.

On tiendra également compte du fait que le niveau piézométrique peut être modifié artificiellement, notamment dans les zones urbaines, par l'épuisement de vastes fouilles ou par d'autres rabattements ou exhaussements de l'aquifère perceptibles à grande distance. Dans ces cas, on ne prélèvera pas les échantillons dans la zone en aval naturelle, inaltérée, mais dans la zone qui se développe au moment de l'échantillonnage. Cependant, toutes les conclusions à long terme portant sur les émissions de polluants et sur les eaux souterraines dignes de protection devront aussi être établies ultérieurement pour la zone en aval naturelle.

## 4 La zone en aval à proximité du site

**Définition:** est réputé « à proximité du site » le secteur d'une zone située à l'aval d'un site pollué, où les substances provenant de ce site qui ont atteint les eaux souterraines sont encore à peine diluées (fig. 4.1) et donc suffisamment concentrées pour permettre une comparaison avec les valeurs de concentration selon l'annexe 1 de l'OSites.

**Cas idéal:** la zone située « à proximité du site » correspond à la ligne de démarcation du site côté aval. Il faudrait prélever les échantillons sur cette ligne. Mais cela s'avère souvent impossible dans la pratique, par exemple lorsque la ligne en question ne peut pas être définie avec précision ou que des constructions empêchent tout prélèvement.

**Approche empirique:** la figure 4.2 présente une approche empirique d'orientation pratique afin de délimiter la « zone en aval à proximité du site ». Cette méthode est aussi applicable lorsque les conditions hydrogéologiques ne sont pas connues avec précision.

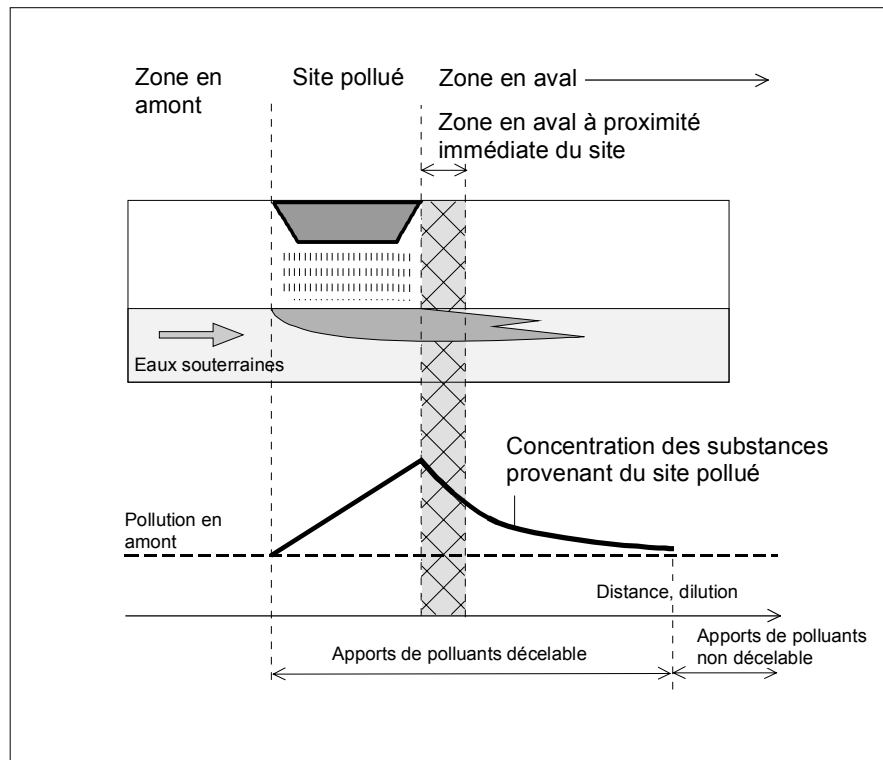


Figure 4.1: La zone en aval à proximité du site

On commence par déterminer le centre de gravité S de la surface du site ou d'un secteur déterminant à l'intérieur du site. Puis on projette ce point S parallèlement à la direction des écoulements souterrains jusqu'à la limite du site, pour obtenir le point R. Dans le prolongement de la droite reliant S à R, on détermine l'étendue maximale  $d_{\max}$  de la « zone en aval à proximité du site » en appliquant la formule empirique suivante:

$$\text{distance maximale } d_{\max}: \frac{2B + 0,5L + T}{10}$$

où

L = longueur du site dans le sens de l'écoulement souterrain (m)

B = largeur du site perpendiculairement à L (m)

T = profondeur du niveau piézométrique au droit du centre de gravité S (m).

Il faut cependant préciser que ce procédé prend surtout en considération les aspects géométriques, au détriment des facteurs hydrogéologiques ou hydrauliques. Cette approche simplifiée n'est donc admissible que si la situation hydrogéologique est simple et si l'aquifère est sensiblement homogène (p. ex. graviers).

Si l'application de la formule ci-dessus débouche sur une distance  $d_{max}$  supérieure à 20 m, on ne peut généralement pas se contenter d'un seul point de prélèvement. Si le site et la zone située à l'aval de celui-ci ont une grande largeur B, il y a également lieu de prévoir plusieurs points de prélèvement (voir à ce sujet le chapitre 6.2). Sauf dans des cas exceptionnels, les points de prélèvement ne seront pas éloignés de plus de 20 à 40 m du site.

Principes:

- Les échantillons d'eau souterraine seront prélevés le plus près possible du site.
- Les facteurs suivants requièrent une délimitation étroite de la zone:
  - présence d'un aquifère à grand débit;
  - présence d'un aquifère à perméabilité élevée;
  - faible profondeur du niveau piézométrique;
  - présence de substances facilement adsorbables ou d'un sous-sol à haute capacité d'adsorption.
- Plus il faut étendre la zone située « à proximité du site » ( $d_{max}$ ), plus il est pertinent de se fonder sur des arguments hydrogéologiques.
- En revanche, si les quantités d'eau qui circulent sont faibles, le sous-sol peu perméable, le niveau piézométrique profond ou les effets de sorption faibles, il est licite d'étendre les limites de la « zone en aval à proximité du site ».

En général, on est confronté à des situations où la circulation des eaux souterraines et la diffusion du panache de pollution suivent des cheminements difficiles à prévoir (fig. 3.2). Il n'est donc pas facile de placer les points de prélèvement avec précision. Dans ces cas, il faut en prévoir d'emblée un grand nombre, en particulier lorsque l'investigation historique laisse soupçonner d'importantes émissions de polluants ou que l'aquifère concerné est particulièrement vulnérable.

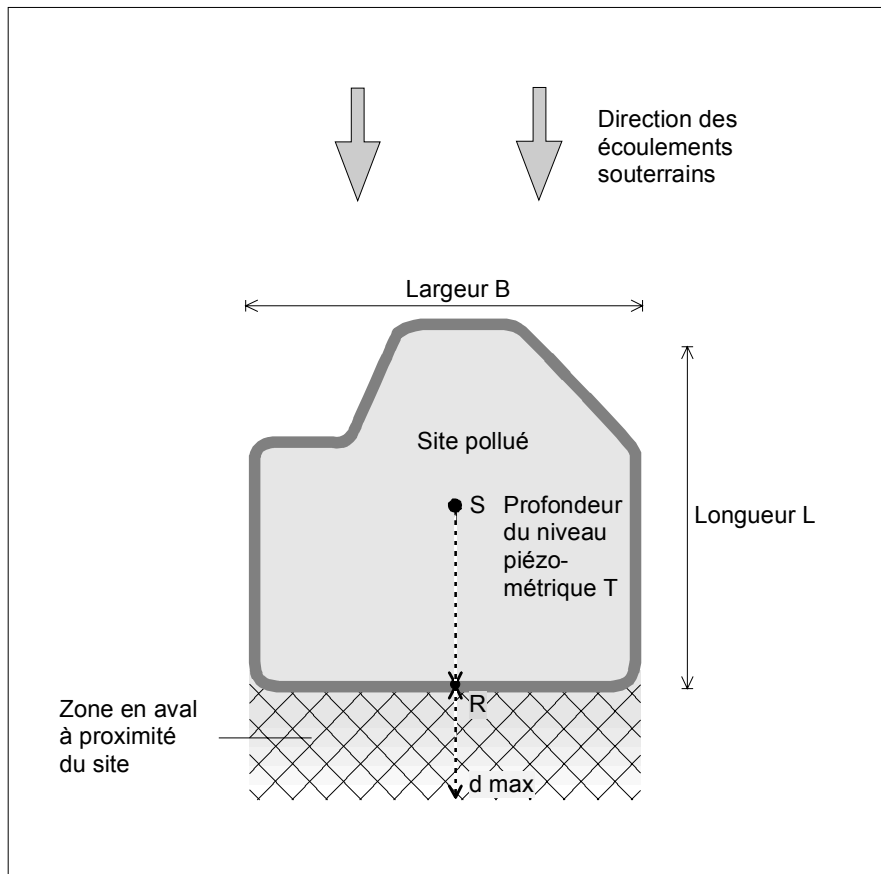


Figure 4.2: Délimitation de la zone en aval à proximité du site

## 5 La zone en amont d'un site pollué

**Détermination des « substances provenant du site » :** dans de nombreux cas, l'échantillonnage en aval d'un site ne suffit pas pour établir si les concentrations mesurées sont imputables au site étudié, si elles proviennent d'un autre site (art. 9 OSites) ou si elles correspondent au « bruit de fond » de la nappe souterraine. Dans de tels cas, il est impératif de prélever également des échantillons en amont du site examiné. L'objectif consiste à identifier et à quantifier les substances qui proviennent de celui-ci, en calculant les différences de concentration en amont et en aval du site (fig. 5.1).

**Points de prélèvement dans la zone en amont d'un site pollué :** ils doivent être placés le plus près possible du site, tout en étant assez éloignés pour ne pas se trouver dans la frange d'une pollution de l'aquifère qui remonterait le courant. Ils seront fixés avec soin, en fonction de critères hydrogéologiques (comme exposé aux chapitres 3 et 4).

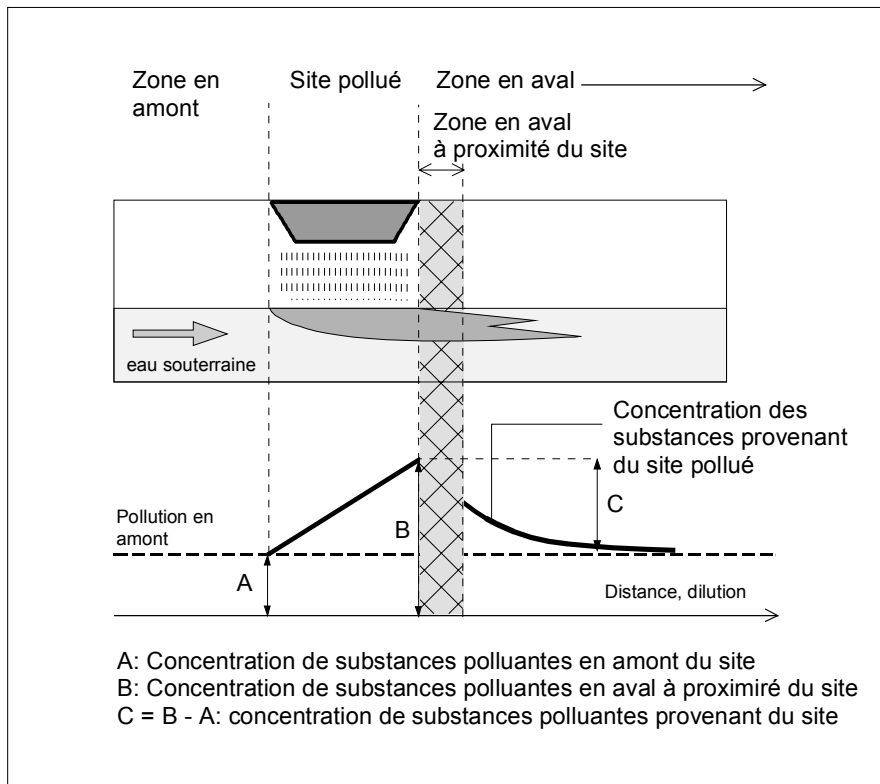


Figure 5.1: Concentration de substances polluantes en amont et en aval d'un site pollué

**Conservation de la preuve:** les échantillons d'eau souterraine prélevés dans la zone en amont servent de référence, car leur composition n'est pas altérée par le site examiné. Ils pourront servir de preuve le cas échéant, notamment pour démontrer qu'une contamination décelée ne provient pas du site examiné. Il est donc particulièrement indiqué de prélever des échantillons en amont du site lorsqu'on a des raisons de penser que l'aquifère peut être gravement pollué par des tiers.

Pour attester la qualité des eaux souterraines en amont du site, on peut aussi prélever un échantillon de référence en position latérale, dans certains cas fondés.

**Procédure par étapes:** l'échantillonnage dans la zone en amont d'un site pollué n'est réellement nécessaire que si la concentration des substances incriminées dans la zone en aval est plus élevée que le « bruit de fond » de l'aquifère considéré. Il peut donc s'avérer judicieux d'attendre les résultats des prélèvements d'eau souterraine en aval du site avant d'envisager un échantillonnage en amont, et de le réaliser si nécessaire dans une deuxième phase. Cette démarche sera mentionnée au préalable dans le cahier des charges.

## 6 Stratégie d'échantillonnage

### 6.1 Modèle hydrogéologique de travail

La condition primordiale pour que les points de prélèvement soient judicieusement placés et pour que la qualité de l'échantillonnage soit irréprochable consiste à suivre une stratégie d'échantillonnage adaptée au cas traité. Elle se base en règle générale sur un modèle hydrogéologique de travail (cf. également les chapitres 3 à 5) qui exige de connaître les éléments suivants:

- la constitution et la perméabilité de l'aquifère, les caractéristiques de son plancher et de sa couverture, les direction(s) et vitesse(s) des écoulements souterrains, ainsi que les variations du niveau piézométrique;
- des données sur les infiltrations d'eau dans la zone polluée ou dans l'un de ses secteurs.

Il arrive fréquemment qu'une partie de ces données doive être estimée au début de l'investigation préalable. Le modèle sera constamment amélioré en fonction de l'avancement des travaux.

Le modèle hydrogéologique de travail devra être achevé et opérationnel au plus tard lorsqu'il s'agira d'établir l'emplacement des points de prélèvement et leur nombre, de préciser leur équipement et de procéder aux échantillonnages proprement dits.

### 6.2 Disposition et nombre de points de prélèvement

L'emplacement, le nombre et la disposition des points de prélèvement dépendent étroitement de l'objectif visé et des questions auxquelles les échantillonnages doivent fournir une réponse (l'objectif « investigation de détail » ne peut pas figurer tel quel dans le cahier des charges selon l'art. 7 OSites).

- **Investigation préalable:** pour être en mesure d'apprécier le besoin de surveillance ou d'assainissement d'un site selon l'art. 9 OSites, il suffit de faire porter l'échantillonnage sur le secteur vraisemblablement le plus pollué de la « zone en aval à proximité du site ». Dans les cas simples, un seul forage peut même suffire. Il est indiqué de placer le point de prélèvement dans le prolongement en aval du centre de gravité du site (ou d'un « hot spot »; fig. 4.2). Si la zone en aval est connue avec une précision insuffisante, on procédera par étapes, en augmentant progressivement le nombre de points de prélèvement en fonction des résultats précédents (fig. 6.1).
- **Investigation de détail ou surveillance:** la qualité des eaux souterraines doit être documentée de manière aussi représentative que possible dans toute la zone en aval du site, et notamment à long terme s'il nécessite une surveillance. Les points de prélèvement seront disposés de manière à permettre de déterminer exhaustivement la nature, l'importance et l'évolution temporelle des émissions.

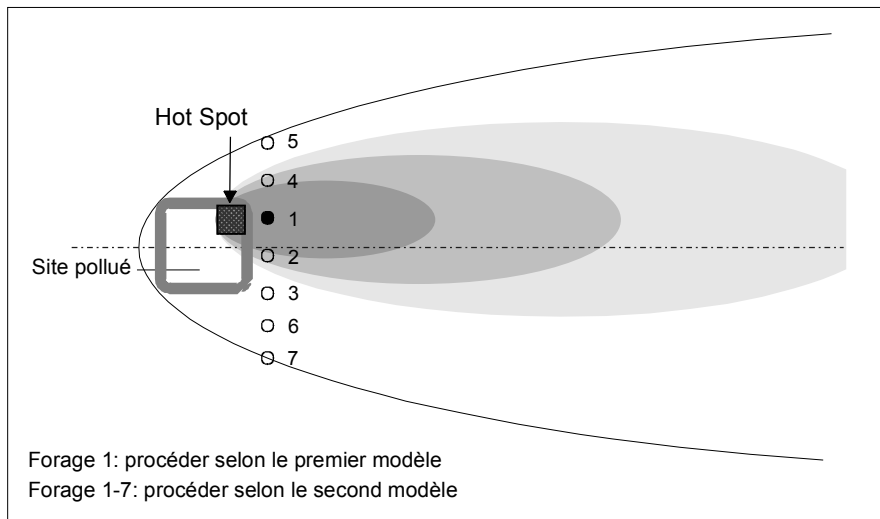


Figure 6.1: Disposition et succession possibles des forages lors d'une approche par étapes

### Nombre de points de prélèvement:

**Principe:** le nombre de points de prélèvement dépend de la complexité des conditions géologiques, de la taille du site, des émissions en provenant et de l'importance des eaux souterraines.

Dans les cas simples, il est possible de se contenter d'un seul point de prélèvement pour évaluer un site dans le cadre d'une investigation préalable, si l'on peut démontrer par une analyse de plausibilité que:

- le potentiel de pollution et de dissémination de polluants à partir du site est modéré;
- le résultat obtenu lors de l'unique échantillonnage est plausible; et
- les émissions à partir du site restent inchangées lorsque les conditions hydrogéologiques varient.

Il est également licite de n'effectuer qu'un seul échantillonnage si le résultat des analyses peut être corroboré par d'autres méthodes, par exemple en soumettant les matériaux du site à des tests de lixiviation.

Si les eaux souterraines de la zone située en aval d'un site pollué doivent être analysées en minimisant les solutions de continuité (conditions complexes, aquifère vulnérable, investigation de détail, surveillance), il y a lieu de prévoir plusieurs points de prélèvement.

La distance idéale entre deux points de prélèvement correspond approximativement à la largeur B de la zone de prélèvement de chaque forage (fig. 6.2). Une restriction s'impose toutefois: il faut généralement pomper une grande quantité d'eau pour générer une zone de prélèvement d'une certaine étendue et elle n'atteint un état stationnaire qu'au terme d'un pompage de longue durée. Lors d'un simple échantillonnage, les quantités d'eau pompées sont habituellement trop faibles et la durée du pompage trop courte pour qu'une zone de prélèvement idéale puisse s'établir.

En situation stationnaire, la largeur B de la zone de prélèvement (ou largeur de prélèvement) à la hauteur du point d'échantillonnage peut être calculée en appliquant la formule simplifiée suivante [17]:

$$B = \frac{Q}{2 \cdot H \cdot i \cdot K}$$

où

- Q = débit prélevé par pompage (m<sup>3</sup>/s)
- H = épaisseur de l'aquifère (m)
- I = gradient hydraulique de l'aquifère (m/m)
- k<sub>f</sub> = perméabilité de l'aquifère (m/s)

Lors d'une **investigation de détail**, il faut généralement échantillonner un secteur représentatif déterminé par avance de la zone en aval du site pour pouvoir calculer des charges polluantes et des scénarios d'émission. A cet effet, on plantera par exemple une rangée de points de mesure perpendiculairement à la direction d'écoulement des eaux souterraines. S'il est prouvé qu'il y a d'importants rejets de substances ou en cas d'accident, il peut être judicieux d'implanter d'autres points de mesure en aval afin de cerner le panache de pollution.

**Optimisation:** en principe, chaque échantillonnage devrait permettre de tirer un maximum d'informations sur le point de prélèvement. Il est souvent plus facile et moins coûteux d'augmenter graduellement le débit pompé lors d'un échantillonnage – comme lors d'un essai de pompage – et de mesurer le rabattement de la nappe, de déterminer la zone de prélèvement et de prélever des échantillons à différents paliers plutôt que de creuser plusieurs forages et de les échantillonner sous un seul régime.

En tout état de cause, il devrait rarement être nécessaire d'appréhender la totalité d'une zone située à l'aval d'un site comme présenté à la figure 6.2. On le fera notamment dans les cas complexes nécessitant une analyse de détail coûteuse.

Exigences logistiques posées à tout point de prélèvement:

- il doit rester accessible durant une longue période, en vue d'échantillonnages futurs;
- il doit être à l'abri des sources de détérioration;
- il doit être protégé de manière à rendre malaisée l'intervention de tiers (p. ex. sabotage);
- il y a lieu d'empêcher toute infiltration de souillures superficielles (p. ex. eaux de chaussées, agriculture).



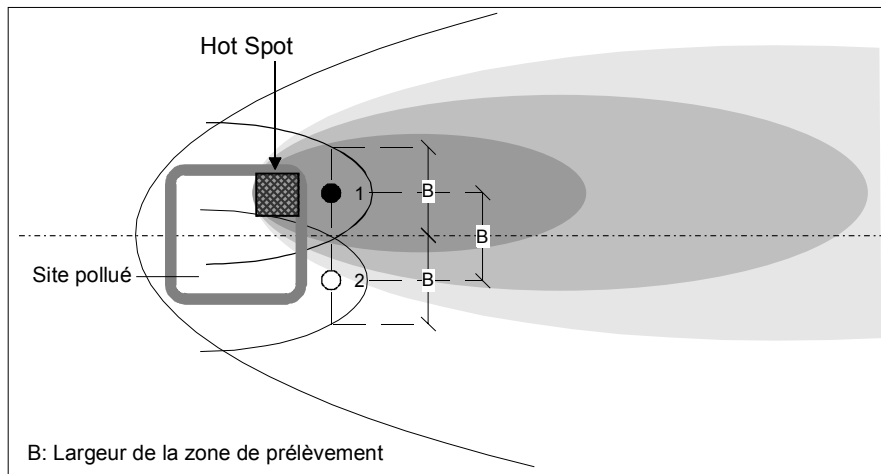


Figure 6.2: Distance idéale entre deux points de prélèvement

Si, pour des raisons hydrogéologiques, un point de prélèvement doit être placé sur le bien-fonds d'un tiers, celui-ci est tenu par la loi de tolérer son implantation puis sa présence (art. 46 LPE). Si l'emplacement prévu est inaccessible, des forages obliques permettront le cas échéant de remédier au problème.

Pour délimiter la zone située à l'aval d'un site pollué, on évitera de placer un point de prélèvement directement dans un site de stockage de déchets, sauf pour résoudre des problèmes spécifiques.

## 6.3 Echantillonnage

Dès le moment où les forages de prélèvement sont exécutés, équipés et déboursés, et que les paramètres hydrauliques sont déterminés, on précise le modèle hydraulique, en le corrigeant si nécessaire. Les échantillonnages proprement dits doivent impérativement être planifiés en fonction de ces données.

Le nombre d'échantillonnages et le moment où ils sont effectués revêtent une importance cruciale. Selon le problème à résoudre, on procédera à ces opérations sous différentes conditions hydrologiques. Le choix du moment approprié relève de la stratégie d'échantillonnage; l'objectif visé devrait être fixé dans le cahier des charges relatif à l'investigation technique selon l'art. 7 OSites.

Les stratégies d'échantillonnage diffèrent tout autant que diffèrent les problèmes à résoudre lors de l'investigation préalable et de l'investigation de détail:

Dans le cadre de l'**investigation préalable**, il y a lieu d'effectuer au moins deux échantillonnages par forage en aval du site, à différentes périodes, pour pouvoir apprécier correctement ce site.

Dans les sites de stockage définitif où le plancher de la décharge se trouve dans la zone de battement du niveau piézométrique ou à proximité de celle-ci, les échantillonnages seront effectués en hautes eaux et en basses eaux, en particulier si l'on soupçonne une pollution par des hydrocarbures. Cette prescription est dictée par l'expérience selon laquelle les pollutions du sous-sol par des huiles

minérales, par exemple, résident fréquemment au sommet de la zone de battement de la nappe souterraine. Dans ce cas de figure, il faut un niveau piézométrique élevé pour que des substances soient mobilisées. Mais il arrive aussi que des substances issues de sites de stockage définitif soient diluées à un tel point en hautes eaux qu'un échantillonnage réalisé uniquement dans ces conditions ne fournit pas une image représentative de la situation.

Dans les aires d'exploitation et les sites de stockage définitif présentant un risque de lessivage par les eaux météoriques, il est conseillé d'effectuer un échantillonnage au terme d'une longue période pluvieuse et un autre à l'issue d'une longue période sèche.

Lors d'une investigation préalable, des échantillonnages « normaux », si possible à jour fixe, devraient suffire. Si l'on constate des différences peu plausibles entre les concentrations en hautes eaux et en basses eaux, on effectuera des prélèvements complémentaires.

Dans le cadre de l'**investigation de détail**, la durée du pompage préalable à l'échantillonnage doit être calculée de manière à ce que l'eau provenant du site pollué parvienne incontestablement aux stations de mesure et que l'investigation porte sur une largeur définie de la zone en aval du site. On trouvera en annexe des formules servant à calculer ou estimer les paramètres nécessaires. Leur détermination, sur la base de données généralement fragmentaires, requiert un conseiller scientifique expérimenté.

Suivant les résultats de l'investigation préalable, il peut être judicieux de prélever, au cours de l'investigation de détail, des échantillons à des profondeurs préétablies. Cette possibilité doit être prise en considération avant de concevoir et d'équiper les stations de mesure. L'expérience a montré qu'il faut installer des tronçons aveugles judicieusement placés, plutôt qu'une crépine continue, en prévision de ces prélèvements.

Il peut arriver qu'il ne soit pas possible de travailler par étapes et qu'il faille regrouper des travaux de reconnaissance par manque de temps, par exemple dans le contexte d'un projet de construction. Pour procéder rapidement à l'estimation des émissions dans un tel cas, on peut par exemple réaliser un échantillonnage à jour fixe, que l'on complétera par des données tirées d'un échantillon prélevé lors d'un pompage de courte durée ou par des analyses du lixiviat provenant du sous-sol pollué.

La figure 6.3 ci-dessous illustre les points abordés au chapitre 6 et résume à nouveau les réflexions qu'il y a lieu de mener pour planifier les échantillonnages d'eau souterraine au niveau stratégique.

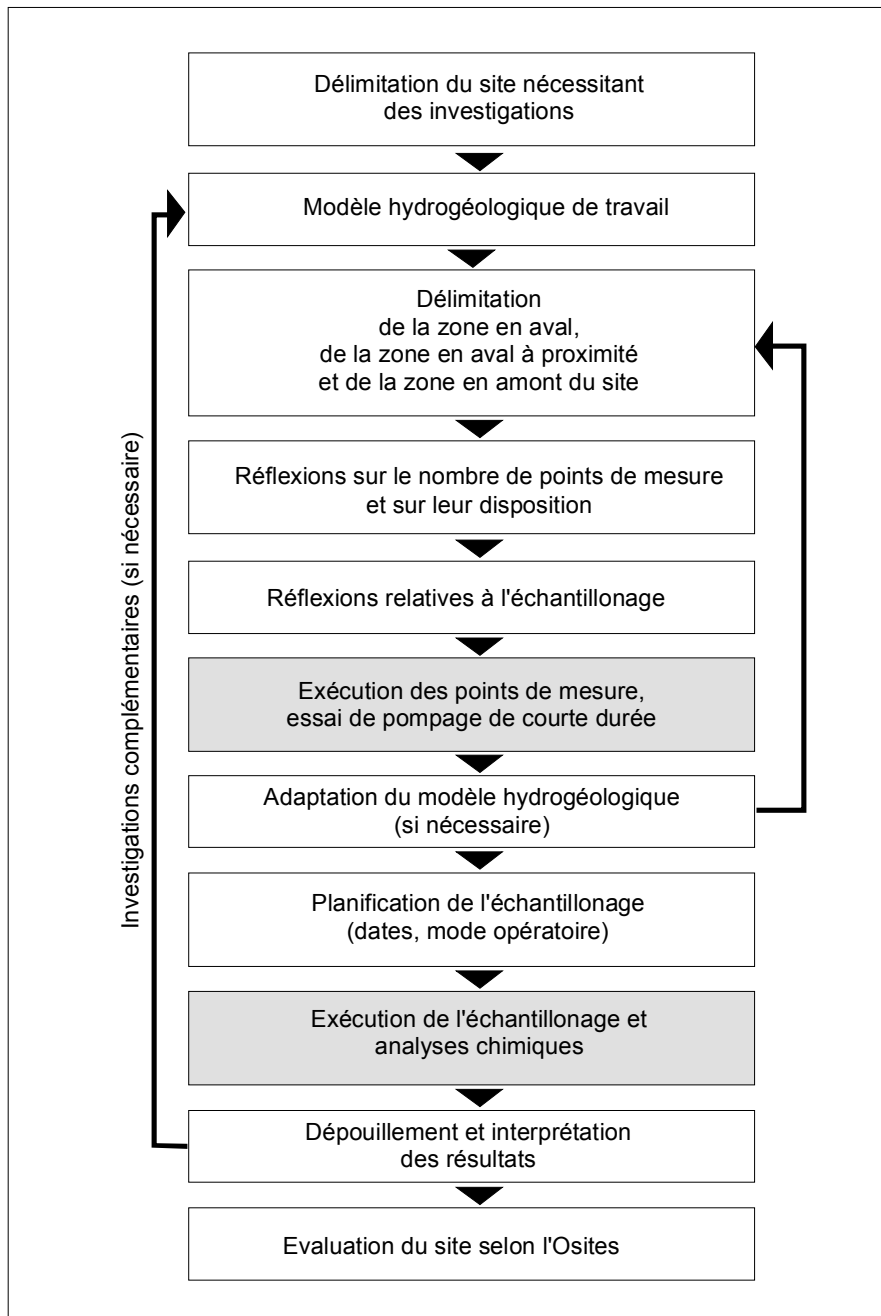


Figure 6.3: Stratégie de planification et d'évaluation des échantillonnages d'eau souterraine

# ANNEXE

---

## Bibliographie complémentaire

Bahrig, B. & Losher, A. (1998): Grundwasserprobenahme: Auswirkungen auf Planung und Begleitung von Sanierungsmassnahmen. UTECH, 9. Kongress Grundwassersanierung, Berlin 19.-20.2.1998.

Bahrig, B. (1994): Hydrogeologische Grundlagen der Grundwasserprobenahme. Vortrag im Fortbildungsseminar « Qualitätsgerechte Grundwasserprobenahme bei Altlasten », Hildesheim 17-19.9.1994.

Barczewski, B., Kaleris, V. & Marschall, P. (1993): Grundwassermesstechnik und Bohrlochhydraulik.- in: DFG-Forschungsbericht « Schadstoffe im Grundwasser », Bd. 1: 277-340.

Church, P. E. & Granato, G. E. (1996): Bias in ground-water data caused by well-bore flow in long-screen wells. Groundwater vol. 34.2.

Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK) (1997): Tiefenorientierte Probenahme aus Grundwassermessstellen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft 245/1997, Bonn.

DIN EN 25667-2 (1993): Wasserbeschaffenheit – Probenahme – Teil 2: Anleitung zur Probenahmetechnik.

Freeze, R.A. & Cherry, J.A. (1979): Groundwater.- 604 pp; Prentice Hall, New Jersey.

Huggenberger, P., Siegenthaler, C. & Stauffer, F. (1988): Grundwasserströmung in Schottern; Einfluss von Ablagerungsformen auf die Verteilung der Grundwasserfliessgeschwindigkeit.- Wasserwirtschaft 78: 202-221.

ISO 5667-1 bis 12 (1980–1995): Water Quality – Sampling.

Käss, W. (1989): Grundwasser-Entnahmegерäte – Zusammenstellung von Geräten für die Grundwasser-Entnahme zum Zweck der qualitativen Untersuchung. – DVWK-Schriften 84: 121–172.

Kinzelbach, W. & Rausch, R. (1995): Grundwassermodellierung, Eine Einführung mit Übungen. Borntreger, Berlin und Stuttgart.

Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg LfU (1996): Handbuch Altlasten und Grundwasserschadensfälle, Leitfaden Erkundungsstrategie Grundwasser. Heft 19.

Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg LfU (1999): Stand des Wissens bezüglich der Beprobung von Grundwasser bei Altlasten. Literaturstudie, ausgeführt durch VEGAS.– Koestler et al., Universität Stuttgart.

Landesamt für Wasser und Abfall Nordrhein-Westfalen (1989): Leitfaden zur Grundwasseruntersuchung bei Altablagerungen und Altstandorten. – LWA-Materialien 7/89.

OFEFP (2002): Echantillonnage des eaux souterraines, Berne.

Powell, R. M. & Puls, R. W. (1997): Hitting the bulls-eye in groundwater sampling. Pollution engineering international.

Remmler, F. (1989): Studie zu möglichen Einflüssen von Messstellenausbau und Pumpenmaterial auf die Beschaffenheit einer Wasserprobe. – DVWK-Studie, 122 S.

Wyssling, L. (1979): Eine neue Formel zur Berechnung der Zuströmungsdauer (Laufzeit) des Grundwassers zu einem Grundwasser-Pumpwerk. Eclogae geol. Helv. 72.2.

## **Lois et ordonnances**

Loi fédérale du 7 octobre 1983 sur la protection de l'environnement (loi sur la protection de l'environnement, LPE), révisée le 21.12.1995, RS 814.01.

Ordonnance du 26 août 1998 sur l'assainissement des sites pollués (ordonnance sur les sites contaminés, OSites), RS 814.680.

Loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux (LEaux), RS 814.20.

Ordonnance du 28.10.1998 sur la protection des eaux (OEaux), RS 814.201.

# Détermination de la largeur de la zone en aval d'un site couverte à partir d'un point de prélèvement, ainsi que du temps de pompage requis

## 1. Dérivé de la formule du cylindre

$$a = 2 \cdot \left( \sqrt{\frac{t_{pv} \cdot Q_{pv} \cdot 3600}{\pi \cdot h_{gw} \cdot n_f}} \right)$$

Cette formule s'applique

- à une première approximation
- aux cas où la vitesse d'écoulement est négligeable

## 2. Equation d'écoulement

$$t_{pv} = \left( \frac{n_f \cdot Q_{pv} \cdot 86400}{2\pi \cdot v_f^2 \cdot h_{gw}} \cdot \left[ x \cdot \frac{2\pi \cdot h_{gw} \cdot v_f}{Q_{pv} \cdot 86400} - \ln \left( x \cdot \sin \left[ y \cdot \frac{2\pi \cdot h_{gw} \cdot v_f}{Q_{pv} \cdot 86400} \right] \div y + \cos \left[ y \cdot \frac{2\pi \cdot h_{gw} \cdot v_f}{Q_{pv} \cdot 86400} \right] \right) \right] \right) \cdot 24$$

Cette formule s'applique aux écoulements permanents et parallèles.

$a$  = largeur de la zone en aval couverte au moment  $t_{pv}$

$t_{pv}$  = durée du pompage (h)

$Q_{pv}$  = débit prélevé (m<sup>3</sup>/s)

$h_{gw}$  = épaisseur de l'aquifère (m)

$n_f$  = porosité efficace

$v_f$  = vitesse de filtration (m/j)

$x, y$  = coordonnées (m) du point de prélèvement

( $x$  = distance au foyer de pollution,  $y = a/2$ )

(Source: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg LfU 1996)