

# **Application de considérations sur la charge aux sites pollués par des hydrocarbures chlorés**

**Rapport d'experts du groupe de travail « Charge » de ChloroNet  
Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)**

**13 octobre 2014**

**Auteur:**

Groupe de travail « Charge » (2013-2014)

Heinrich Adler	AFU St. Gallen / DGP ChloroNet
Gabriele Büring	DP ChloroNet
Marc-André Dubath	Geotest SA
Thomas Eisenlohr	Dr. Heinrich Jäckli AG
Bettina Flury	CSD Ingenieure AG
Bernhold Hahn	AWEL Zürich (direction)
Peter Polack	Geotechnisches Institut AG
Yvan Rossier	HydroGeAp

Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement, OFEV :

Sybille Kilchmann	OFEV, Division Eaux
Monika Schwab-Wyssler	OFEV, division Sols et biotechnologie / DP ChloroNet
Christiane Wermeille	OFEV, division Sols et biotechnologie

Le présent rapport d'experts a été élaboré sur mandat de l'OFEV par le groupe de travail « Charge » institué dans le cadre du projet ChloroNet. Les mandataires portent seuls la responsabilité du contenu et il reflète donc l'avis de ce groupe d'experts au moment de sa rédaction et sera amené à évoluer.

# Application de considérations sur la charge aux sites pollués par des hydrocarbures chlorés

## Management Summary

### Mandat et application

**Exigence légale** En vertu de l'art. 14, al. 1, de l'ordonnance sur les sites contaminés (OSites), différents critères sont déterminants pour évaluer les buts et l'urgence de l'assainissement d'un site contaminé. Figurant explicitement parmi ces critères au même titre que le type, l'emplacement, la quantité et la concentration des substances dangereuses pour l'environnement, l'évolution temporelle des atteintes à l'environnement ainsi que l'emplacement et l'importance des domaines environnementaux menacés, la charge fait partie intégrante de l'estimation de la mise en danger prescrite lors de l'investigation de détail.

**Mandat** Les experts du projet sectoriel « Gestion des risques » de ChloroNet ont estimé que la charge est un critère important dans l'étude des pollutions par des hydrocarbures chlorés (HCC). Un groupe de travail séparé a été chargé de définir la notion de charge, analyser son application actuelle en Suisse, décrire les possibilités et les limites des méthodes permettant de la déterminer (p. ex. modélisation) et élaborer des critères régissant l'application de considérations relatives à la charge. Les discussions menées au sein de ce groupe de travail et les résultats qu'il a obtenus sont consignés dans le présent rapport.

**Application** Ce rapport d'experts est destiné à étayer les décisions et les discussions des autorités et des spécialistes qui considèrent la charge lors d'une pollution par des HCC. Leurs décisions ne se fonderont pas uniquement sur la charge mais tiendront également compte des autres critères mentionnés à l'art. 14 OSites, dont il y aura lieu de vérifier la cohérence avec la charge.

### Considérations sur la charge appliquées aux sites pollués par des HCC

**Définition de la notion de charge** La charge de HCC liée à un site pollué est définie comme étant la quantité de HCC [g ou kg] entraînée par les eaux souterraines à partir de ce site durant une unité de temps [j ou an]. Le site est défini conformément au projet sectoriel « Gestion des risques » de ChloroNet.

**Domaines d'application** Les considérations au sujet de la charge sont notamment prises en compte pour évaluer l'urgence d'un assainissement et pour estimer la mise en danger de l'environnement. La charge peut aussi être un critère décisif pour définir des priorités ou une aide utile pour fixer des mesures d'assainissement, adapter les buts de l'assainissement, apprécier la possibilité de l'interrompre ou évaluer les résultats.

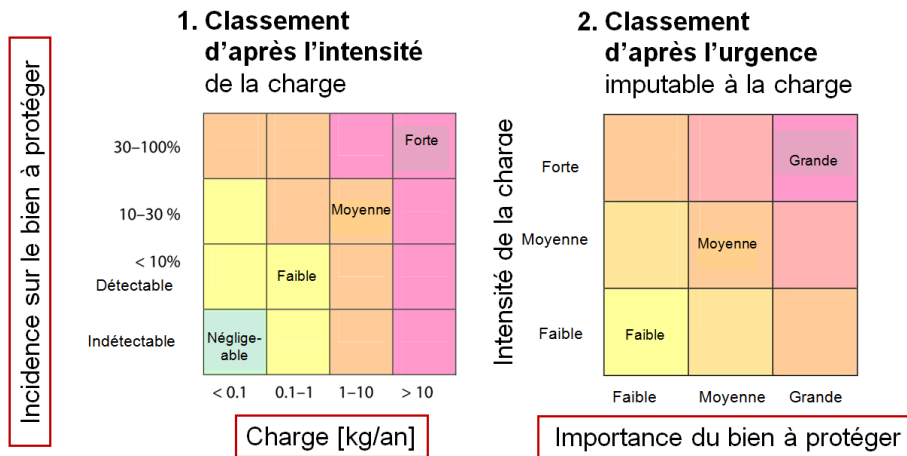
Les considérations au sujet de la charge ne permettent pas de classer les sites, c'est-à-dire d'évaluer leur besoin de surveillance ou d'assainissement. Les seules exigences numériques déterminantes sont les valeurs de concentration figurant dans l'ordonnance sur les sites contaminés.

**Exigences sur l'acquisition des données** L'emplacement de la section de contrôle et le choix des paramètres à étudier pour tenir compte de la charge revêtent une grande importance. Il est donc nécessaire d'élaborer une stratégie d'échantillonnage appropriée. Elle dépend du but poursuivi, de la précision requise et des conditions hydrogéologiques du site. Les aspects techniques exposés dans le rapport d'experts se fondent notamment sur les explications fournies dans le manuel sur les sites contaminés du Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (volume 3, partie 6, 2008).

**Modèles de charge** La détermination, l'interprétation et les prévisions relatives à la charge peuvent aller d'estimations simples à la mise en œuvre de modèles complexes en passant par des bilans par cellules. L'intérêt principal de la modélisation réside dans les pronostics sur l'évolution de la pollution et dans la compréhension du contexte hydrogéologique. Elle fournit des informations importantes sur

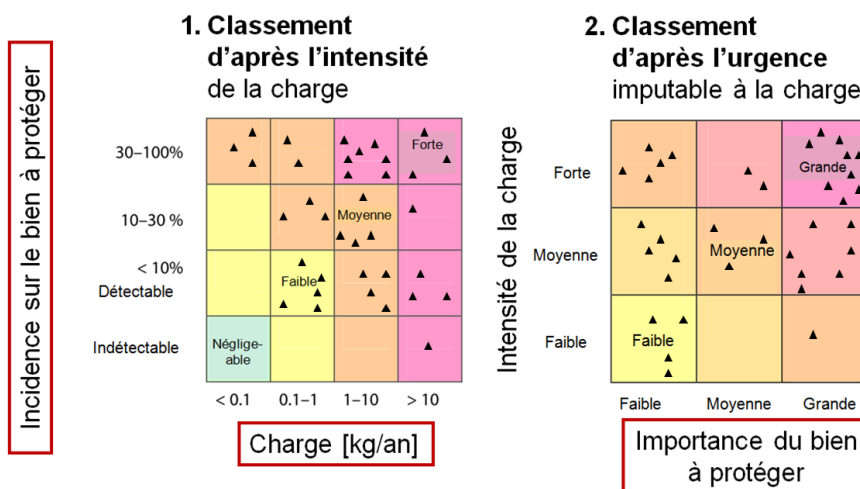
les mesures à réaliser et la distribution des polluants à laquelle il faut s'attendre. Le prix élevé de la modélisation doit être mis en regard de l'utilité des résultats qu'elle permet d'obtenir.

**Solution envisagée pour évaluer l'incidence de la charge** Le rapport d'experts expose une démarche possible permettant d'évaluer l'urgence d'un assainissement en se fondant sur la charge. Le modèle préconisé comprend deux étapes. L'intensité de la charge polluante est d'abord déterminée à partir d'une estimation de sa grandeur et de son incidence sur le bien à protéger. Puis la combinaison de l'intensité avec l'importance du bien à protéger fournit un classement sommaire du site considéré d'après l'urgence de l'assainissement liée à la charge. Le rapport d'experts précise les critères charge, incidence sur le bien à protéger et importance du bien à protéger.



**Figure 1:** Modèle en deux étapes proposé pour évaluer l'urgence d'un assainissement.

**Validation du modèle d'évaluation** Le groupe de travail a discuté du modèle d'évaluation et l'a vérifié à l'aide d'exemples. Puis plusieurs cantons l'ont validé en l'appliquant à plusieurs cas pratiques qu'ils ont eu à traiter. L'importance du bien à protéger et l'incidence de la charge sur ce bien peuvent être appréciés différemment selon la situation locale. Par exemple, si le bien à protéger a partout la même importance, il suffit de réaliser la première étape (classement du site d'après l'intensité de la charge). Les résultats de la validation présentés dans la figure suivante montrent que le modèle est applicable et utile pour évaluer l'urgence d'un assainissement en considérant la charge.



**Figure 2:** Validation du modèle avec distribution des résultats d'évaluations.

# Application de considérations sur la charge aux sites pollués par des hydrocarbures chlorés

## Table des matières

Management Summary .....	3
1. Introduction .....	7
2. Définition de la notion de charge .....	8
3. La charge dans le contexte juridique .....	10
3.1 L'évaluation d'un site pollué selon le droit sur les sites pollués .....	10
3.2 La charge dans l'ordonnance sur les sites contaminés (OSites) .....	11
3.3 La charge dans l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) .....	13
4. Domaines d'application des considérations sur la charge.....	15
5. Exigences à l'endroit de l'acquisition des données .....	19
5.1 Emplacement de la section du panache (section de contrôle).....	19
5.2 Paramètres impliqués .....	20
5.3 Stratégie d'échantillonnage.....	23
5.3.1 Détermination ponctuelle de la charge.....	23
5.3.2 Détermination de la charge pondérée en fonction de l'arrivée d'eau.....	24
5.3.3 Synthèse des combinaisons entre la stratégie et le mode d'échantillonnage .....	26
5.4 Evaluation et interprétation des résultats des mesures .....	26
5.5 Prise en compte de l'évolution temporelle .....	27
5.6 Analyse d'erreur.....	27
5.7 Résumé concernant la stratégie d'échantillonnage .....	28
6. Modèles de charge.....	29
7. Solution envisagée pour évaluer l'incidence de la charge.....	30
7.1 Comparaison avec la prise en compte de la charge à l'étranger .....	30
7.2 Conditions posées à la solution envisagée.....	30
7.3 Modèle d'évaluation .....	31
7.4 Echelonnement du modèle d'évaluation.....	33
7.5 Exemples d'application .....	34
7.6 Suite des travaux .....	35
Annexe 1: Remarques concernant la détermination de la charge – Modélisation d'Yvan Rossier.....	36
Annexe 2: Description de différents modèles d'évaluation appliqués à l'étranger.....	37

## Liste des figures

Figure 1	Illustration des termes « secteur en aval à proximité du site » et « section du panache ».	9
Figure 2	Éléments de l'aménagement du territoire destinés à protéger les eaux souterraines.	13
Figure 3	Le « tronçon sinistré » dans la protection des eaux souterraines.	14
Figure 4	Hiérarchisation de sites distincts.	15
Figure 5	Hiérarchisation des divers secteurs d'un site.	15
Figure 6	Exemple de subdivision d'un site en secteurs susceptibles de faire l'objet de mesures.	16
Figure 7	Propagation de polluant dans la zone saturée.	19
Figure 8	Illustration des transects (source: manuel sur les sites contaminés du Land de Hesse).	20
Figure 9	Sections du panache lorsqu'une et deux couches aquifères sont polluées.	22
Figure 10	Propagation de la pollution sur une large section.	22
Figure 11	Distribution des points de mesure dans l'approche ponctuelle (coupe transversale).	23
Figure 12	Distribution des points de mesures dans l'approche pondérée avec détermination verticale.	24
Figure 13	Illustration d'un essai de pompage intégral (source: guide de Hesse).	25
Figure 14	Illustration des combinaisons entre la stratégie et le mode d'échantillonnage.	26
Figure 15	Illustration du modèle des tubes de courant (source: guide de Hesse).	26
Figure 16	Illustration du modèle des transects (source: guide de Hesse).	27
Figure 17	Illustration des combinaisons guidant le choix de la stratégie d'échantillonnage.	28
Figure 18	Illustration du modèle en deux étapes appliqué pour évaluer l'urgence d'un assainissement liée à la charge.	32
Figure 19	Application du modèle d'évaluation: exemple n° 1.	34
Figure 20	Application du modèle d'évaluation: exemple n° 2.	35
Figure 21	Illustration de différentes approches suivies pour évaluer une pollution (en Suisse, en Allemagne et en France).	37

## 1. Introduction

Le présent rapport d'experts résume les discussions menées au sein du groupe de travail « Charge » de ChloroNet et les conclusions qu'il en a tirées. Il est parti des résultats obtenus jusqu'alors dans le projet sectoriel « Gestion des risques », qui avait considéré la charge comme un critère important pour évaluer la situation et pour prendre des décisions en cas de pollution par des hydrocarbures chlorés (HCC), ce qui a suscité l'institution d'un groupe de travail ad hoc.

Le groupe de travail « Charge » a été chargé des tâches suivantes:

- définir la notion de charge;
- analyser et évaluer l'application actuelle de la charge en Suisse;
- décrire les possibilités et les limites des méthodes permettant d'estimer la charge;
- élaborer des critères permettant d'incorporer des considérations relatives à la charge.

Les questions soulevées ont été discutées, puis les résultats obtenus, les supports utilisés et les solutions ébauchées ont été consignés lors de sept séances qui ont eu lieu en 2013. Ils ont aussi été présentés lors de la journée technique ChloroNet de novembre 2013; les exposés sont publiés sur le site web de ChloroNet, à l'adresse <http://www.bafu.admin.ch/chloronet/05751/13034/index.html?lang=fr>

Le présent rapport d'experts est destiné à étayer les discussions et les décisions des autorités et des experts qui considèrent la charge lors d'une pollution par des HCC. Il ne constitue en revanche ni une aide pratique ni une directive indiquant comment exécuter le droit en vigueur. Les résultats qu'il présente seront intégrés dans les prochains travaux relatifs au projet sectoriel « Gestion des risques ».

## 2. Définition de la notion de charge

La charge est généralement définie dans la littérature spécialisée comme étant

### **la masse transportée par unité de temps.**

Les explications ci-après utilisent comme référence le site pollué par des HCC. Elles considèrent la quantité de HCC entraînée par les eaux souterraines à partir de ce site. C'est donc lui qui sert de point de référence lorsqu'on détermine la charge de polluant. Il en découle une définition plus précise de la charge:

**La charge de HCC liée à un site pollué est définie comme étant la quantité de HCC [g ou kg] transportée par les eaux souterraines à partir de ce site durant une unité de temps [j ou an].**

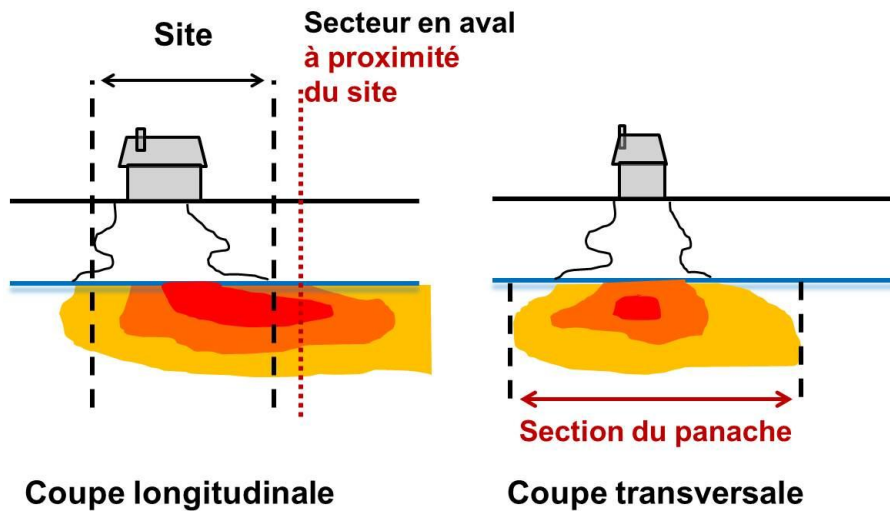
Les définitions et les hypothèses suivantes sont appliquées:

- *Le site considéré est délimité conformément au projet sectoriel « Gestion des risques » de ChloroNet.*  
En ce qui concerne la zone saturée, le site est notamment délimité en appliquant une teneur dans la matière solide égale à 1,0 mg/kg pour le cumul des sept HCCV pris en compte<sup>1</sup>, conformément à l'OTD (valeur I). (Voir à ce sujet le tableau « Sites pollués par des HCC: critères de délimitation et de radiation du cadastre », état au 25 octobre 2013)
- *Seuls les HCC transportés par les eaux souterraines sous forme dissoute sont pris en compte.*  
L'éventuelle dissémination de HCC sous forme de phase (p. ex. DNAPL) ou via d'autres vecteurs comme l'air interstitiel ou l'adsorption dans la zone de battement n'est pas prise en compte.
- *Le panache en aval du site ou panache de pollution est la partie de la zone saturée de l'aquifère qui présente des teneurs en HCC dans les eaux souterraines largement supérieures à une éventuelle pollution de fond. La section géométrique du panache de pollution est nommée ci-après « section du panache » ou « section de contrôle ».*
- *C'est généralement la section du panache située en aval à proximité du site qui est prise en compte pour estimer la charge.*  
Ce secteur est le plus représentatif des émissions dégagées par le site. De plus, la teneur en HCC qu'il renferme est déterminante pour évaluer le site et il présente généralement la plus grande densité de données disponibles. Ainsi, les éventuels processus de dégradation ou d'adsorption, qui compliquent l'interprétation, sont volontairement laissés de côté. Pour les étudier, il faut examiner des sections de panaches plus éloignées (transects).
- *L'évaluation globale est souvent complexe lorsqu'il y a des produits de dégradation en quantités notables. C'est pourquoi il faut les considérer séparément de cas en cas.*

<sup>1</sup>  $\Sigma$  7 HCCV selon l'OTD: dichlorométhane, trichlorométhane, tétrachlorométhane, cis-1,2-dichloroéthylène, 1,1,1-trichloroéthane, trichloroéthylène (Tri), tétrachloroéthylène (Per).



La figure ci-après illustre schématiquement une dissémination typique de HCC dans la zone saturée. Le site est délimité conformément aux critères applicables à cette zone selon le projet sectoriel « Gestion des risques » de ChloroNet, ce qui permet de déterminer ensuite le secteur en aval à proximité du site (voir la coupe longitudinale).



**Figure 1** Illustration des termes « secteur en aval à proximité du site » et « section du panache ».

La définition de la charge doit donc répondre aux exigences suivantes:

#### Synthèse concernant la définition de la charge

- La charge est définie en se fondant sur la définition du site retenue dans le cadre du projet sectoriel « Gestion des risques » de ChloroNet.
- Il en résulte que seuls les HCC transportés par les eaux souterraines sous forme dissoute interviennent dans la charge.
- La section du panache qui doit être considérée se trouve généralement en aval à proximité du site. Mais elle peut aussi être située plus loin en aval selon le problème qui se pose.
- Les autres vecteurs de transport, comme l'air interstitiel, ne sont pas pris en compte.

*Remarque: le chapitre 5 fournit des définitions plus détaillées (équation de Darcy, etc.).*

### 3. La charge dans le contexte juridique

Ce chapitre expose les interactions entre le droit régissant les sites pollués et le droit régissant la protection des eaux, en mettant l'accent sur la prise en compte de la charge.

#### 3.1 L'évaluation d'un site pollué selon le droit sur les sites pollués

L'évaluation de la nécessité de surveiller ou d'assainir un site pollué est réglementée dans la section 3 de l'ordonnance sur les sites contaminés (OSites). Elle prend le site pollué comme point de référence et considère les émissions provenant de ce site. Ce sont les eaux souterraines qui représentent le bien à protéger le plus important et le plus fréquemment touché en cas de pollution par des HCC.

Comme les zones industrielles – et par conséquent les pollutions aux HCC – se trouvent plutôt dans des plaines fluviales, les eaux souterraines affectées sont très souvent situées dans un secteur  $A_u$  de protection des eaux (eaux souterraines exploitables et zones attenantes nécessaires à leur protection). Les exigences à l'endroit des eaux souterraines utilisées comme eau potable ou destinées à l'être sont fixées dans l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux), notamment sous la forme de contraintes chiffrées (concentrations; annexe 2, ch. 22, OEaux). L'OSites applique le même type de critère: **les valeurs de concentration relevées en aval à proximité du site** déterminent s'il faut procéder à un assainissement ou à une surveillance. La nécessité de le faire est réglementée explicitement à l'art. 9 OSites:

#### Art. 9 OSites Protection des eaux souterraines (ordonnance sur les sites contaminés, état le 1<sup>er</sup> août 2012)

<sup>1</sup> Un site pollué nécessite une surveillance du point de vue de la protection des eaux souterraines, sous réserve de l'al. 1<sup>bis</sup>:

- a. si le lixiviat des matériaux présents sur le site dépasse la **valeur de concentration mentionnée à l'annexe 1**; ou
- b. si, dans les eaux souterraines situées dans le secteur  $A_u$  de protection des eaux, la concentration des substances s'écoulant du site dépasse, en aval à proximité du site, 10 % de la **valeur de concentration mentionnée à l'annexe 1**; ou
- c. si, dans les eaux souterraines situées hors du secteur  $A_u$  de protection des eaux, la concentration des substances s'écoulant du site dépasse, en aval à proximité du site, 40 % de la **valeur de concentration mentionnée à l'annexe 1**.

<sup>1bis</sup> Si une surveillance de plusieurs années révèle que, en raison des caractéristiques du site et de l'évolution des concentrations de polluants au cours du temps, le site ne nécessitera très probablement pas d'assainissement selon l'al. 2, la surveillance du site n'est plus nécessaire.

<sup>2</sup> Un site pollué nécessite un assainissement du point de vue de la protection des eaux souterraines:

- a. si, dans des captages d'eaux souterraines destinées à l'usage public, on constate la présence de substances provenant du site et susceptibles de polluer les eaux;
- b. si, dans les eaux souterraines situées dans le secteur  $A_u$  de protection des eaux, la concentration des substances s'écoulant du site dépasse, en aval à proximité du site, la moitié de la **valeur de concentration mentionnée dans l'annexe 1**;
- c. si, dans les eaux souterraines situées hors du secteur  $A_u$  de protection des eaux, la concentration des substances s'écoulant du site dépasse, en aval à proximité du site, le double de la **valeur de concentration mentionnée dans l'annexe 1**; ou
- d. si, selon l'art. 1, let. a, le site nécessite une surveillance et qu'il présente un danger concret de pollution des eaux souterraines en raison d'une rétention ou d'une dégradation insuffisante des substances provenant du site.

L'art. 10, qui traite de la protection des eaux de surface, se réfère également aux valeurs de concentration mentionnées à l'annexe 1 de l'OSites.

Le besoin de surveillance ou d'assainissement est ainsi évalué en fonction des émissions provenant du site, principalement exprimées sous la forme de valeurs de concentration en aval à proximité du site (en tenant aussi compte du lixiviat et d'une rétention ou dégradation insuffisante). La charge n'est en revanche pas mentionnée à cet effet.

**Les considérations sur la charge ne servent pas à classer les sites – à évaluer leur besoin de surveillance ou d'assainissement. Ce sont uniquement les valeurs de concentration mentionnées dans l'ordonnance sur les sites contaminés qui sont déterminantes à cet effet.**

### 3.2 La charge dans l'ordonnance sur les sites contaminés (OSites)

Dans l'OSites, la charge est mentionnée explicitement à l'art. 14, consacré à l'investigation de détail.

#### Art. 14 Investigation de détail

<sup>1</sup> Pour apprécier les buts et l'urgence de l'assainissement, les données suivantes sont identifiées dans le détail et évaluées sur la base d'une estimation de la mise en danger:

- a. type, emplacement, quantité et concentration des substances dangereuses pour l'environnement présentes sur le site pollué;
- b. type des atteintes à l'environnement effectives et possibles, **charge** et évolution de ces atteintes dans le temps;
- c. emplacement et importance des domaines environnementaux menacés.

La charge doit donc être déterminée (« identifiée dans le détail ») et évaluée au stade de l'investigation de détail. Elle entre ensuite dans l'appréciation des **buts** et de l'**urgence** de l'assainissement. Mais elle n'est qu'UN des critères mentionnés à l'art. 14 OSites (type, emplacement, quantité, évolution dans le temps, etc.).

Le **but de l'assainissement** consiste, d'après l'art. 15, al. 1, OSites, à « ...éliminer les atteintes, ou les dangers concrets d'apparition de telles atteintes, qui ont été à l'origine des besoins d'assainissement visés aux art. 9 à 12 ». On peut s'écarter de ce but, en vertu de l'art. 15, al. 2 et 3, OSites, lorsque toutes les conditions suivantes sont satisfaites:

- ce faisant, on réduit globalement la pollution de l'environnement *et*
- les coûts sont disproportionnés *et*
- les exigences relatives à la qualité des eaux formulées dans la législation sur la protection des eaux sont respectées.

Les exigences de l'OEaux à l'endroit des HCC (1 µg/l pour chaque substance) ne permettent pas de s'écarter du but de l'assainissement dans un secteur A<sub>v</sub> de protection des eaux si de telles substances sont à l'origine de la pollution considérée. Notons que le but de l'assainissement selon l'OSites (0,5 µg/l) est inférieur aux exigences de l'OEaux (1µg/l) lorsque du chlorure de vinyle est à l'origine de la pollution.

Il est possible de s'écarter du but de l'assainissement hors des secteurs A<sub>u</sub> de protection des eaux, car c'est alors l'influence sur les eaux de surface (exfiltration d'eaux souterraines) qui est prépondérante.

Conclusion: le but de l'assainissement, la dérogation à ce but et son adaptation dépendent principalement de valeurs de concentration, de même que le classement du site examiné. La charge n'est pas ici un facteur limitatif fixé juridiquement. Le but de l'assainissement ne fait l'objet d'aucune marge de manœuvre à l'intérieur des secteurs A<sub>u</sub> de protection des eaux, alors que les exigences ne sont pas aussi strictes à l'extérieur – où la charge peut être appliquée comme aide la décision.

L'art. 15 OSites stipule ce qui suit concernant l'**urgence** d'un assainissement:

#### **Art. 15 Buts et urgence de l'assainissement**

<sup>4</sup> Les assainissements sont particulièrement urgents lorsqu'une utilisation existante est entravée ou directement menacée.

<sup>5</sup> Sur la base de l'investigation de détail, l'autorité évalue les buts et l'urgence de l'assainissement.

Cet article dit seulement qu'un assainissement est urgent lorsqu'une utilisation existante, en particulier un captage d'eau potable, est entravée ou directement menacée. Il ne prescrit aucun autre critère pour évaluer l'urgence d'assainir. Comme il fait à nouveau référence à l'art. 14 (investigation de détail), qui mentionne la charge parmi les critères d'appréciation, celle-ci peut être invoquée pour évaluer le degré d'urgence (solution concrète envisagée exposée au chapitre 7).

#### **La charge dans l'ordonnance sur les sites contaminés**

- La détermination de la charge, mentionnée à l'art. 14 OSites, fait partie de l'investigation de détail.
- Outre la charge, l'art. 14 OSites indique également d'autres critères à mettre en œuvre pour apprécier les buts et l'urgence d'un assainissement, comme le type, l'emplacement, la quantité et la concentration des substances dangereuses pour l'environnement présentes sur le site pollué ainsi que l'évolution temporelle des atteintes à l'environnement.
- L'art. 15 OSites stipule que la possibilité de s'écarter du but d'un assainissement dépend principalement des exigences à l'endroit de la qualité des eaux et en particulier de la valeur fixée par l'OEaux. Il n'y a donc aucune marge de manœuvre en cas de pollution par des HCC dans un secteur A<sub>u</sub> de protection des eaux (exception: le chlore de vinyle).
- La marge de manœuvre pour s'écarter du but d'un assainissement est plus large hors des secteurs A<sub>u</sub> de protection des eaux. La charge peut y être appliquée comme aide à la décision supplémentaire.
- L'urgence d'un assainissement est appréciée en fonction de la mise en danger de l'environnement estimée au terme d'une investigation de détail. **La prise en compte de la charge constitue donc, du point de vue du droit sur les sites pollués, un critère devant être appliqué, parmi d'autres, pour estimer la mise en danger de l'environnement et pour apprécier l'urgence d'un assainissement.**

### 3.3 La charge dans l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux)

L'OEaux vise, comme l'OSites, à protéger l'environnement contre les atteintes nuisables. Si l'OSites traite de l'assainissement des pollutions existantes, l'OEaux privilégie la protection des eaux et la préservation de leur utilisation. Elle applique donc le principe de précaution.

#### Art. 1 OEaux But et principe

(ordonnance sur la protection des eaux, état le 1<sup>er</sup> janvier 2014)

<sup>1</sup> La présente ordonnance a pour but de protéger les eaux superficielles et les eaux souterraines contre les atteintes nuisibles et de permettre leur utilisation durable.

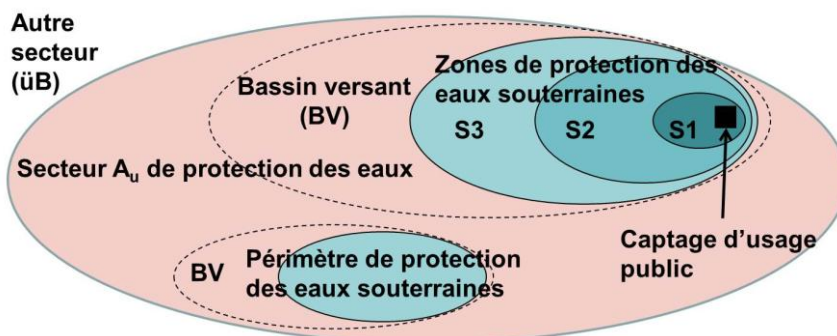
<sup>2</sup> A cet effet, toutes les mesures prises en vertu de la présente ordonnance doivent tenir compte des objectifs écologiques fixés pour les eaux (annexe 1).

L'OEaux considère ainsi moins les valeurs décrivant les émissions – devant être évitées – que les objectifs écologiques et les exigences chiffrées formulées à l'endroit des eaux souterraines exploitables. La charge n'a donc aucune incidence sur la protection des eaux souterraines d'après l'OEaux, seules les valeurs de concentration étant déterminantes pour apprécier les possibilités d'utiliser les eaux souterraines.

Les objectifs écologiques selon l'annexe 1 OEaux s'appliquent à toutes les nappes d'eau souterraine – secteurs  $A_u$  de protection des eaux et autres secteurs (üB) – quels que soient leur type et leur utilisation. Ils sont donc formulés d'une manière générale. Par ailleurs, la concentration de polluants ne doit pas augmenter continuellement dans les eaux souterraines, en vertu de l'annexe 2, ch. 21 (aggravation interdite), et ces substances ne doivent pas polluer des eaux superficielles lors de l'exfiltration d'eaux souterraines.

L'annexe 2, ch. 22, formule des exigences supplémentaires à l'endroit des eaux souterraines utilisées comme eau potable ou destinées à l'être, qui concernent donc le secteur  $A_u$  de protection des eaux. Les contraintes additionnelles selon ce ch. 22 englobent les exigences formulées dans la législation sur les denrées alimentaires (valeurs de tolérance et valeurs limites selon l'ordonnance sur les substances étrangères et les composants, OSEC) et les exigences applicables à certaines substances données, dont les HHV (hydrocarbures halogénés volatils), assortis d'une valeur limite de 0,001 mg/l pour chaque substance.

*Le graphique suivant illustre les éléments de l'aménagement du territoire destinés à protéger les eaux souterraines. Les exigences chiffrées de l'annexe 2, ch. 22, OEaux s'appliquent au secteur  $A_u$  de protection des eaux ainsi qu'aux zones et aux périmètres de protection des eaux souterraines.*



**Figure 2** Eléments de l'aménagement du territoire destinés à protéger les eaux souterraines.

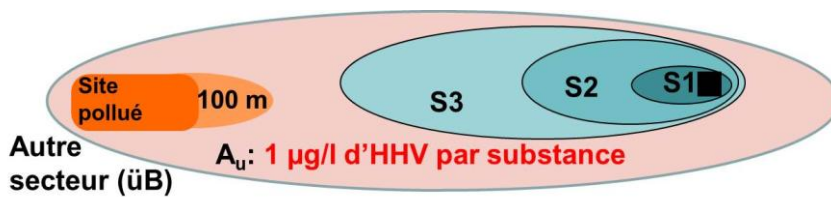
Ces dispositions ne s'appliquent pas en aval des sites pollués:

**Annexe 2, ch. 22, al.2, OEaux**

« ...Pour les substances provenant de sites pollués, les présentes exigences ne s'appliquent pas en aval de ces sites dans la zone où la majeure partie de ces substances sont dégradées ou retenues. »

L'OEaux ne donne aucune indication chiffrée en ce qui concerne la taille et en particulier la longueur de ce tronçon situé en aval du site. Il peut être qualifié de « tronçon sinistré » et son extension de 100 m a été fixée, dans le traitement des sites contaminés, par analogie avec d'autres sources d'émissions (utilisation de la chaleur, construction d'ouvrages).

La concentration des polluants doit atteindre les exigences chiffrées à l'intérieur de ce tronçon sinistré.



**Figure 3** Le « tronçon sinistré » dans la protection des eaux souterraines.

Que se passe-t-il lorsque les exigences chiffrées de l'annexe 2 OEaux ne sont pas satisfaites et qu'une utilisation particulière des eaux n'est donc pas garantie? L'art. 47 OEaux règle la question et décrit la démarche générale à suivre lorsque des eaux sont polluées:

- déterminer et évaluer la nature et l'ampleur de la pollution;
- déterminer les causes de la pollution;
- évaluer l'efficacité des mesures envisageables;
- prendre les mesures requises, en vertu des prescriptions pertinentes.

Cela implique que les sites pollués doivent généralement faire l'objet d'investigations, voire d'un projet d'assainissement.

Conclusion: la protection des eaux se base essentiellement sur les exigences chiffrées régissant leur qualité. La notion de charge n'est pas mentionnée dans l'OEaux en lien avec l'évaluation de ce bien à protéger.

**La charge dans l'ordonnance sur la protection des eaux**

- Le droit de la protection des eaux applique le principe de précaution. Il vise à ce que les eaux puissent être utilisées durablement, en tenant compte d'objectifs écologiques.
- La qualité de l'eau souterraine utilisée comme eau potable fait l'objet d'exigences chiffrées supplémentaires.
- Dans les secteurs  $A_u$  de protection des eaux, chaque HCC est soumis à une concentration limite de 0,001 mg/l.
- Lorsqu'une pollution des eaux est constatée, il faut déterminer sa cause et prendre les mesures requises. Le cas échéant, il y a donc lieu de réaliser des investigations, voire des mesures d'assainissement, conformément au droit sur les sites pollués.
- **La notion de charge n'apparaît pas dans le droit sur la protection des eaux, sauf dans le cas particulier du déversement d'eaux usées industrielles dans les eaux.**

#### 4. Domaines d'application des considérations sur la charge

Ce chapitre traite de la question suivante:

*Quels problèmes peuvent être résolus, à quelle étape du traitement des sites contaminés, en considérant la charge?*

A cet effet, les étapes usuellement suivies dans le traitement des sites contaminés sont examinées en tenant compte de l'utilité des considérations relatives à la charge et de leur application:

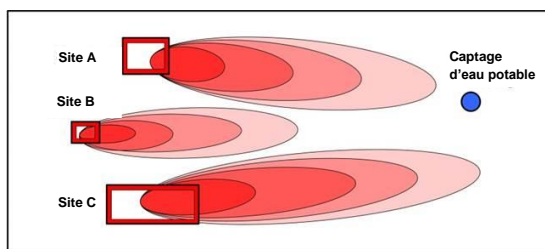
- a) Toutes les étapes
- b) Investigation préalable
- c) Investigation de détail / projet d'assainissement
- d) Surveillance / suivi

- **Toutes les étapes: compréhension du site**

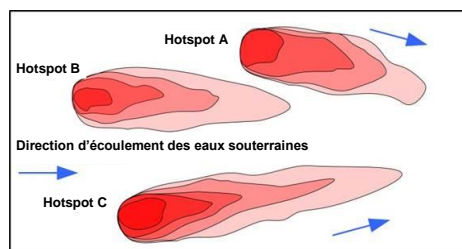
La charge est prise en compte utilement pour mieux comprendre un site pollué à chaque étape de son traitement. Elle peut aussi servir de critère pour vérifier la plausibilité du potentiel polluant, des mécanismes de transport, de l'hydrogéologie, etc. Relevons que sa pertinence croît d'une étape à l'autre à mesure que les données acquises s'étoffent.

- **Toutes les étapes: hiérarchisation en présence de plusieurs foyers de pollution**

Lorsque plusieurs foyers de pollution par des HCC participent à la pollution globale d'eaux souterraines, la charge peut, en plus des concentrations respectives des HCC en aval à proximité des divers foyers, aider considérablement à hiérarchiser les assainissements envisageables en fonction de leur apport à l'environnement. Il n'est alors pas très important de savoir si on est en présence de plusieurs sites indépendants (figure de gauche) ou de plusieurs secteurs d'un seul et même site (figure de droite).



**Figure 4** Hiérarchisation de sites distincts.



**Figure 5** Hiérarchisation des divers secteurs d'un site.

- **Investigation préalable: estimation « précoce » de la mise en danger**

D'après l'art. 7, al. 1, OSites, les données acquises lors de l'investigation préalable sont évaluées du point de vue de la mise en danger de l'environnement, ce qui revient à estimer « précocement » ladite mise en danger. Mais les considérations sur la charge faites au stade de l'investigation technique doivent être relativisées, car les données sont alors généralement clairsemées. Il faut tenir compte des erreurs possibles.

- **Investigation de détail / projet d'assainissement: estimation de la mise en danger de l'environnement et évaluation de l'urgence d'un assainissement**

La charge n'est mentionnée explicitement qu'à l'art. 14, al.1, let. b, OSites. Mais elle n'est qu'un des critères énumérés dans cet article qui servent à estimer la mise en danger de l'environnement (type, emplacement, quantité, concentration, évolution des atteintes effectives et possibles, emplacement et importance des domaines environnementaux menacés).

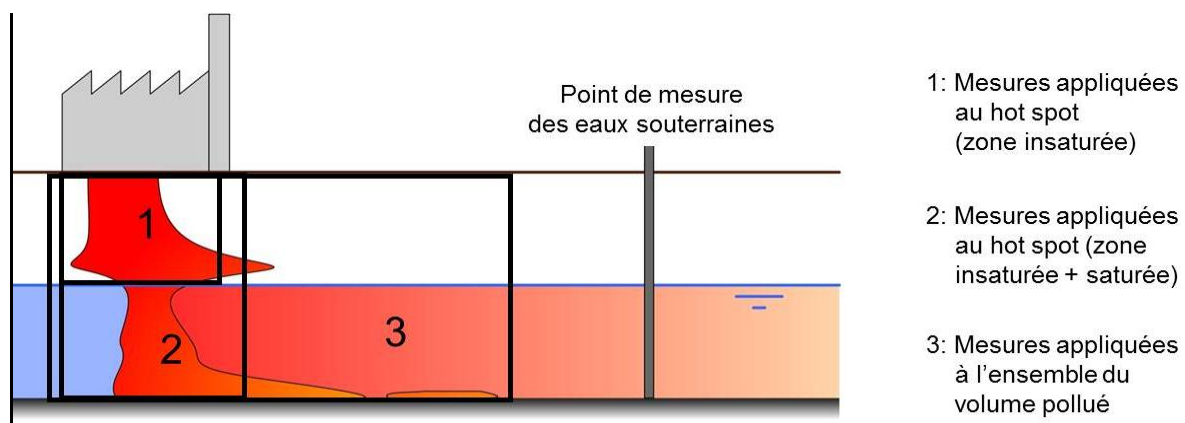
En vertu de l'art. 14, en lien avec l'art. 15, l'estimation de la mise en danger de l'environnement réalisée dans le cadre de l'investigation de détail sert à évaluer l'urgence d'un assainissement.

**→ L'évaluation de l'urgence d'un assainissement peut donc être vue comme l'un des principaux domaines d'application des considérations sur la charge.**

(Voir une solution envisagée au chapitre 7)

- **Investigation de détail / projet d'assainissement: établissement des mesures nécessaires**

D'après l'art. 17 OSites, le projet d'assainissement décrit l'incidence des mesures prévues sur l'environnement. Lorsque plusieurs variantes sont examinées, les décisions sont mieux étayées si l'on tient compte, outre les valeurs de concentration, des effets des diverses mesures envisagées sur les charges émises.



**Figure 6** Exemple de subdivision d'un site en secteurs susceptibles de faire l'objet de mesures.



- **Investigation de détail / projet d'assainissement: adaptation du but de l'assainissement**

Comme indiqué précédemment, au chapitre 3, le but d'un assainissement est principalement tributaire de valeurs de concentration. De plus, les dispositions de l'OEaux ne permettent guère de l'adapter en cas de pollution par des HCC dans un secteur A<sub>u</sub> de protection des eaux. La charge ne joue donc aucun rôle ici.

L'art. 15 OSites permet en revanche de s'écarter quelque peu du but de l'assainissement dans un autre secteur de protection des eaux (üB), car l'OEaux est alors moins sévère. S'il faut s'attendre AVANT la mise en œuvre de mesures d'assainissement à ce que le besoin d'assainir au sens de l'OSites ne puisse pas être supprimé, il est possible d'adapter la valeur de concentration visée. L'autorité vérifiera le bien-fondé de cette dérogation en vertu de l'art. 18, al. 1, let. e, OSites. Il peut être utile de considérer la charge à cet effet.

- **Surveillance / suivi: évaluation de la réussite de l'assainissement**

Ce sont les valeurs de concentration selon l'annexe 1 OSites qui sont déterminantes pour évaluer la réussite d'un assainissement. Mais la charge compte parmi les principaux autres critères mesurables à cet effet.

- **Surveillance / suivi: adaptation du but de l'assainissement**

Lorsque le but visé par un assainissement n'a pas été atteint une fois les mesures achevées, une adaptation de ce but est généralement envisagée, en procédant aux mêmes considérations qu'à l'étape de l'investigation de détail (voir ci-dessus, art. 15 OSites). Il peut alors être utile d'invoquer la charge pour évaluer d'autres mesures.

- **Surveillance / suivi: évaluation de l'interruption de l'assainissement**

Lorsque le but visé par l'assainissement n'a pas été atteint, la « manière extrême » d'adapter le but est d'interrompre l'assainissement. Bien que cette décision se fonde à nouveau essentiellement sur des valeurs de concentration, elle peut être étayée en invoquant la charge (p. ex. si l'urgence de l'assainissement n'est plus la même après qu'avant la mise en œuvre des mesures).

### **Résumé concernant les domaines d'application de la charge**

- D'après l'OSites, la charge doit être prise en compte pour évaluer l'urgence d'un assainissement au stade de l'investigation de détail.
- L'étude de la charge favorise toujours la compréhension du site. Elle peut donc être invoquée en principe à chaque étape du traitement des sites contaminés. Sa pertinence dépend des données disponibles et elle doit être étayée par une analyse d'erreur.
- La charge est un critère – parmi d'autres – important pour estimer la mise en danger de l'environnement.
- La charge peut être un critère décisif pour poser des priorités lorsque plusieurs sites ou plusieurs secteurs d'un site sont pollués.
- La considération de la charge apporte une aide utile pour fixer des mesures d'assainissement, pour adapter le but de l'assainissement, pour apprécier l'opportunité de l'interrompre et pour évaluer sa réussite.

## 5. Exigences à l'endroit de l'acquisition des données

*Remarque préliminaire: la partie 6, volume 3, du manuel sur les sites contaminés du Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, publiée en 2008 et intitulée « Ermittlung von Schadstofffrachten im Grund- und Sickerwasser », fournit des informations détaillées concernant la détermination de la charge de polluant dans les eaux souterraines, qui ont servi de base au groupe de travail « Charge ». Il y est fait référence dans le présent document sous la désignation « Guide de Hesse ».*

[www.hlug.de/vertrieb/schrift/schriftenreihen/handbuch-altlasten.html](http://www.hlug.de/vertrieb/schrift/schriftenreihen/handbuch-altlasten.html)

Les références au guide de Hesse concernent **uniquement l'aspect technique et les stratégies d'échantillonnage**. L'évaluation des résultats qu'il décrit n'est pas reprise ici, car la législation allemande ne traite pas les sites contaminés de la même manière que l'ordonnance suisse sur les sites contaminés (voir chapitre 7.1).

Trois questions essentielles se posent généralement lorsqu'il s'agit de planifier la détermination de la charge polluante:

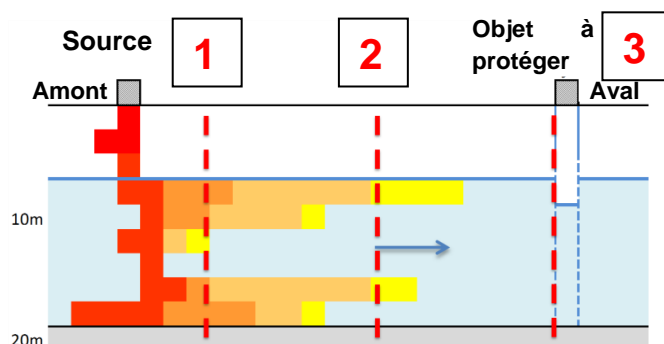
- Où faut-il déterminer la charge?  
(Quel doit être l'emplacement de la section de contrôle?)
- Quels paramètres doivent être mesurés?  
(Qu'est-ce qui est connu et qu'est-ce qui doit être déterminé?)
- Quelle stratégie d'échantillonnage est appropriée?  
(Quels enseignements peut-on tirer, moyennant quel investissement?)

La réponse à ces trois questions dépend essentiellement du but des considérations sur la charge (domaines d'application au chapitre 4). Elle détermine l'ampleur des investigations et par conséquent leur prix.

### 5.1 Emplacement de la section du panache (section de contrôle)

L'emplacement de la section du panache à étudier dépend de la question posée. D'après le chapitre 4, la charge est notamment invoquée pour apprécier l'urgence d'un assainissement. Il faut alors évaluer la charge issue du site concerné. C'est la zone située en aval à proximité du site, la plus documentée, qui représente le mieux ces émissions.

La figure suivante illustre la propagation de HCC – leur concentration mesurable – dans la zone saturée. La section de contrôle est placée prioritairement à la hauteur du point [1], mais elle peut aussi être posée au point [2] ou [3] selon la question posée (étude des immissions dans un captage).

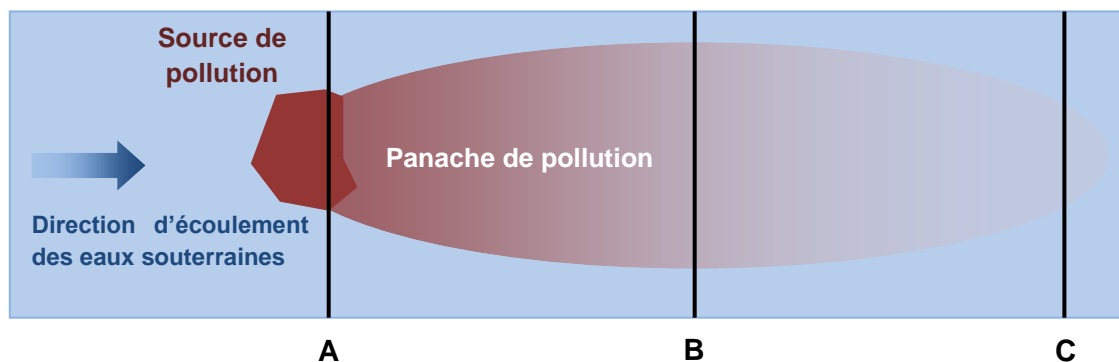


**Figure 7** Propagation de polluant dans la zone saturée.

Plus la distance augmente, plus le risque est grand que la dilution du polluant accroisse l'incertitude des mesures jusqu'à « faire disparaître la charge » lorsque la teneur en HCC tombe au-dessous de la limite de détection et échappe donc aux mesures.

Pour évaluer les processus de dégradation ou de rétention, il faut étudier une grande partie du panache de pollution. La section de contrôle sera donc placée à une plus grande distance du site. Il arrive même souvent qu'on pose plusieurs sections géométriques (dites « transects ») perpendiculaires à la direction d'écoulement des eaux souterraines.

La figure suivante, tirée du guide de Hesse, illustre ce procédé à l'aide des trois transects A, B et C.



**Figure 8** Illustration des transects (source: manuel sur les sites contaminés du Land de Hesse).

### Emplacement de la section du panache de pollution

- L'émission de polluant à partir du site considéré est la mieux représentée lorsque la section examinée du panache est placée en aval à proximité du site. Cette position est appropriée dans la plupart des domaines d'application de la charge.
- Pour évaluer les processus de dégradation et de rétention et pour examiner les immissions (p. ex. dans un captage d'eau souterraine), il faut déterminer la charge à différentes distances du site afin d'appréhender le panache de pollution.

## 5.2 Paramètres impliqués

D'après le chapitre 2, la charge est définie comme étant la quantité de HCC transportée par les eaux souterraines à partir du site durant une unité de temps.

Elle est donc calculée à l'aide de l'équation suivante:

$$\text{Charge} = Q \cdot c$$

$Q = \text{débit [m}^3/\text{s]}$   
 $c = \text{concentration [g/m}^3\text{]}$

Le débit  $Q$  est calculé en appliquant l'équation de Darcy, ce qui nécessite de considérer une section donnée du panache:

$$Q = K \cdot i \cdot A$$

$K = \text{coefficient de perméabilité (ou conductivité hydraulique) [m/s]}$   
 $i = \text{gradient (hydraulique) [-]}$   
 $A = \text{section [m}^2\text{]}$

En vertu de ces deux équations, la charge est calculée comme suit:

$$\text{Charge} = K i A c$$

### ***Coefficient de perméabilité K***

Le coefficient de perméabilité K varie tellement (souvent de plusieurs ordres de grandeur) dans le sous-sol hétérogène de la Suisse que sa détermination précise demande des investigations très conséquentes. C'est pourquoi, soit on applique des valeurs typiques tirées de la littérature spécialisée (tableaux de perméabilité des terrains meubles), soit on détermine la perméabilité à l'aide d'essais classiques (pompage, exhaussement, rabattement, etc.). L'essai de pompage devrait être utilisé de préférence, car il fournit une valeur moyenne qui reflète les conditions régnant effectivement au voisinage du tronçon filtrant d'un point de mesure. La perméabilité peut aussi être estimée au moyen d'autres essais (diagraphies, débitmètres, etc.). (Voir

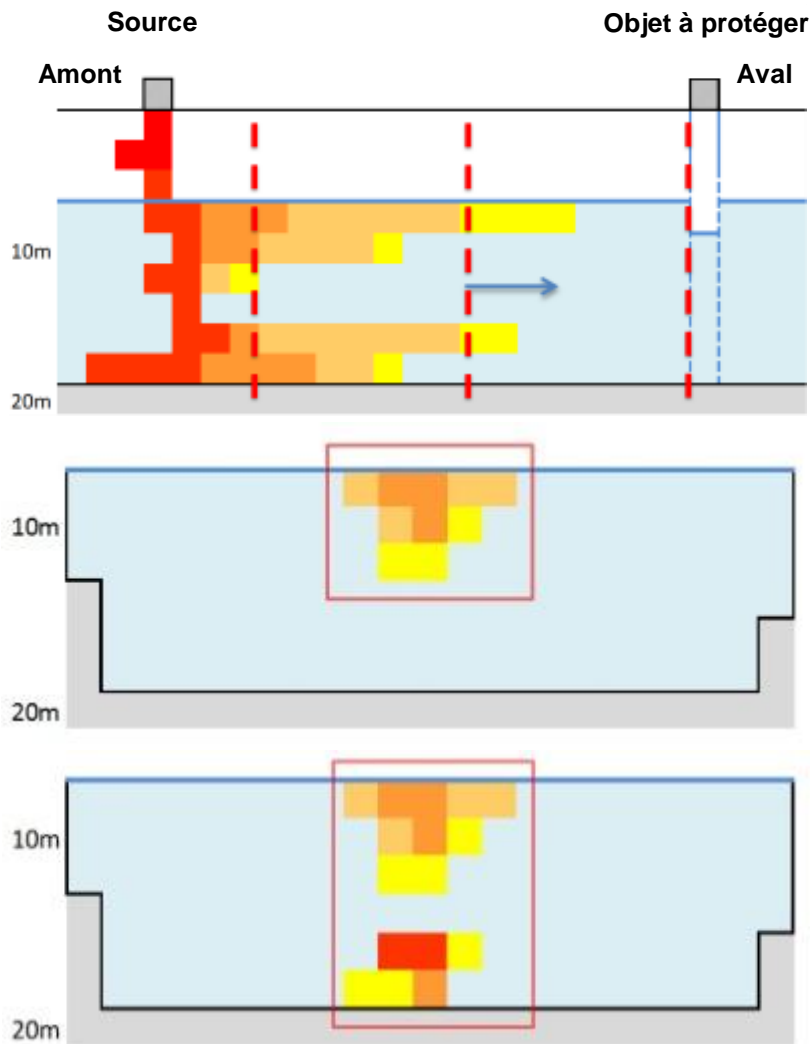
[http://books.google.ch/books/about/Quantitative\\_Erkundung\\_von\\_Lockergestein.html?id=QkUxGwAACAAJ&redir\\_esc=y](http://books.google.ch/books/about/Quantitative_Erkundung_von_Lockergestein.html?id=QkUxGwAACAAJ&redir_esc=y))

### ***Gradient i***

Le gradient  $i$  désigne la pente de la surface de la nappe phréatique à l'emplacement de la section géométrique du panache de pollution. Il est déterminé en mesurant le potentiel hydraulique (dans des piézomètres disposés en triangle). On peut aussi appliquer des capteurs de pression. Dans certains cas complexes (aquifères superposés), les conditions sont appréhendées séparément dans les différents niveaux pollués.

### ***Section A (section du panache de pollution)***

Le choix de l'emplacement et de la grandeur de la section examinée peut influencer notablement la pertinence des considérations au sujet de la charge. Cette section sera généralement adaptée à l'extension du panache de pollution.



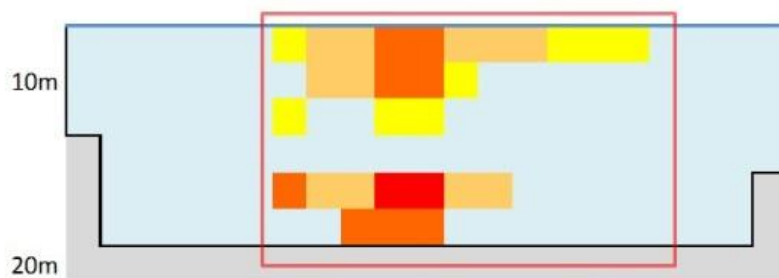
**Figure 9** Sections du panache lorsqu'une et deux couches aquifères sont polluées.

**En haut:** dissémination typique de HCC, vue en coupe longitudinale dans le sens de l'écoulement.

**Au milieu:** section transversale dans le cas où une couche aquifère est polluée

**En bas:** section transversale dans le cas où deux couches aquifères sont polluées.

Il est nécessaire d'étendre la section lorsque la pollution se propage sur une grande largeur.



**Figure 10** Propagation de la pollution sur une large section.

## Concentration $c$

La concentration des polluants est déterminée selon l'aide à l'exécution de l'OFEV intitulée « Prélèvements d'eau souterraine en relation avec les sites pollués »<sup>2</sup>.

### Précisions concernant la détermination des paramètres impliqués

- L'ampleur des travaux nécessaires pour déterminer les paramètres impliqués dépend du but des considérations sur la charge et de leur pertinence souhaitée.
- L'estimation de la charge annuelle doit tenir compte des variations saisonnières de tous les paramètres (p. ex. alternance de hautes eaux et de basses eaux).
- Tous les paramètres doivent faire l'objet d'une analyse d'erreur. L'incertitude globale qui en résulte rend compte de la pertinence de l'estimation de la charge.

## 5.3 Stratégie d'échantillonnage

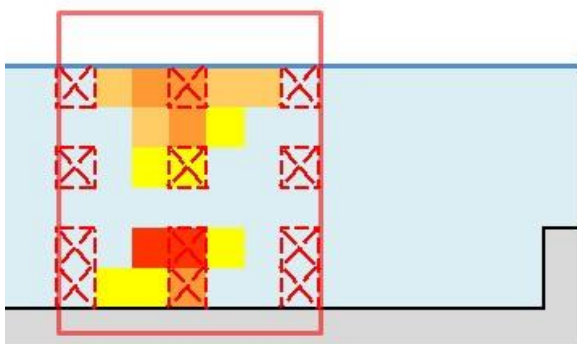
Pour être à même de déterminer la charge le plus précisément possible, il faut disposer d'un réseau de points de mesure extrêmement dense dans toute la section géométrique, ce qui est généralement impossible à un coût raisonnable.

Deux approches sont applicables dans la pratique pour déterminer la charge totale à un coût raisonnable:

- détermination ponctuelle;
- détermination pondérée en fonction de l'arrivée d'eau.

### 5.3.1 Détermination ponctuelle de la charge

Les paramètres  $K$ ,  $i$  et  $c$  sont déterminés à plusieurs endroits de la section examinée en procédant à un échantillonnage étagé (prélèvements en divers points de profondeurs différentes), puis la charge est établie à chacun des points de mesure. La charge totale est ensuite calculée soit par cumul des sections partielles du panache de pollution, soit par interpolation des valeurs obtenues entre les sections examinées (voir chapitre 5.4).



**Figure 11** Distribution des points de mesure dans l'approche ponctuelle (coupe transversale).

<sup>2</sup> Prélèvements d'eau souterraine en relation avec les sites pollués, OFEFP (actuellement OFEV), 2003.

Cette méthode requiert soit un grand nombre de piézomètres, soit des **piézomètres multi-niveaux**.

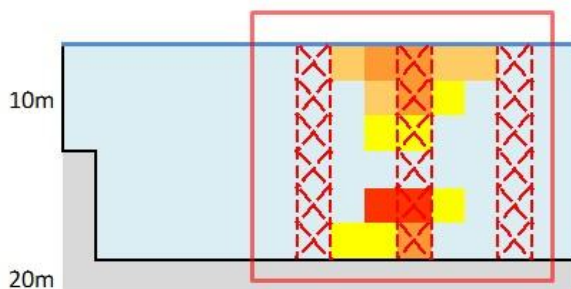
**Avantages et inconvénients de la détermination ponctuelle de la charge au moyen de piézomètres multiniveaux**

- + Informations au sujet de la répartition de la pollution
- + Aucun court-circuit hydraulique
- Gros travail imputable aux déterminations sélectives
- Nécessité de connaître préalablement la situation locale

**5.3.2 Détermination de la charge pondérée en fonction de l'arrivée d'eau**

Dans ce cas, des charges partielles sont mesurées verticalement (prélèvements sur plusieurs colonnes complètes) ou verticalement et horizontalement, au moyen de **piézomètres entièrement crépinés**. Les échantillons retirés fournissent dans le cas idéal une valeur mixte pondérée selon l'arrivée d'eau. On relève donc directement à chaque point de mesure des charges partielles qui pourront être interpolées sur toute la section de contrôle.

**a) Détermination de la charge en direction verticale**



**Figure 12** Distribution des points de mesures dans l'approche pondérée avec détermination verticale.

**Avantages et inconvénients de la détermination verticale de la charge au moyen de piézomètres entièrement crépinés**

- + Quantité de travail appropriée
- + Précision
- Aucune information au sujet du gradient
- Risque de court-circuit hydraulique
- Aucune information au sujet de la répartition verticale de la pollution

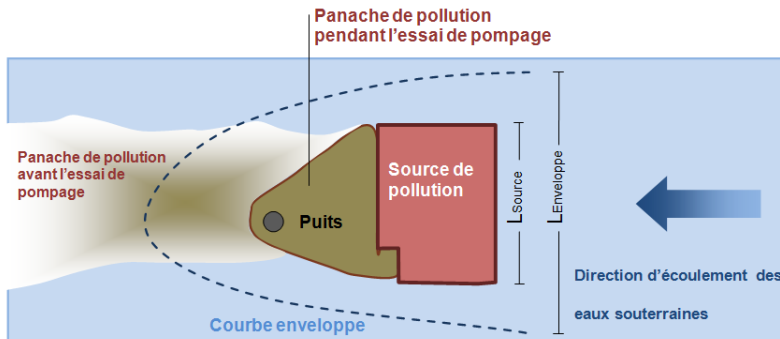
**b) Détermination de la charge en direction verticale et horizontale par essai de pompage intégral**

L'essai de pompage intégral est un mode particulier de détermination pondérée de la charge qui englobe tout à la fois la composante verticale et la composante horizontale. Elle permet d'appréhender toute la largeur du panache de pollution au moyen d'un seul ou éventuelle-



ment de quelques piézomètres entièrement crépinés en pratiquant un essai de pompage approprié. Aucune interprétation ni interpolation n'est nécessaire, contrairement au cas des autres modèles.

Le guide de Hesse fournit des indications détaillées à ce sujet.



**Figure 13** Illustration d'un essai de pompage intégral (source: guide de Hesse).

### ***Avantages et inconvénients des essais de pompage intégraux***

- + Bon rapport précision / ampleur des travaux
- Conditions non stationnaires
- Risque de court-circuit hydraulique

### 5.3.3 Synthèse des combinaisons entre la stratégie et le mode d'échantillonnage

		Direction horizontale	
		Ponctuelle (pompage courte durée)	Pondérée (pompage de longue durée)
Direction verticale	Ponctuelle	Plusieurs piézomètres multiniveaux	-
	Pondérée	Plusieurs piézomètres entièrement crépinés (1D)	Un ou quelques piézomètres entièrement crépinés (2D)

**Figure 14** Illustration des combinaisons entre la stratégie et le mode d'échantillonnage.

Remarque: la précision 1D ou 2D indique une approche unidimensionnelle ou bidimensionnelle en cas d'essai de pompage intégral.

### 5.4 Evaluation et interprétation des résultats des mesures

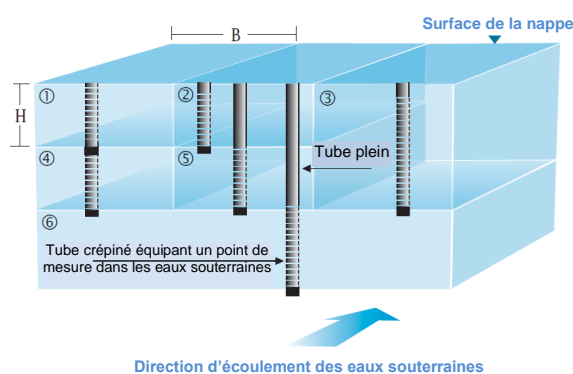
Les méthodes suivantes sont applicables pour interpoler les résultats des mesures:

- modèle des tubes de courant;
- modèle des transects.

Aucune interpolation n'est nécessaire dans le cas des essais de pompage intégraux, comme mentionné précédemment.

#### **Modèle des tubes de courant**

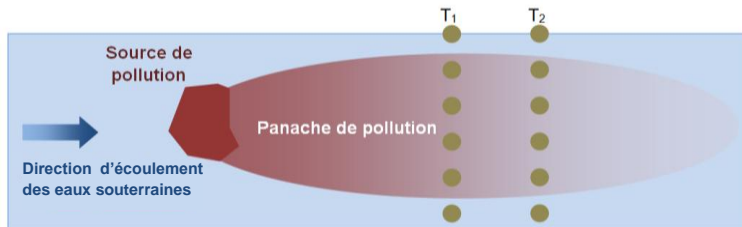
Le modèle des tubes de courant est généralement appliqué pour interpoler les résultats tirés de la détermination ponctuelle de la charge. Il consiste à subdiviser le panache de pollution en plusieurs parties (tubes de courant) et à calculer la charge séparément pour chacun d'entre eux. Puis les charges ainsi calculées sont cumulées.



**Figure 15** Illustration du modèle des tubes de courant (source: guide de Hesse).

### Modèle des transects

Le modèle des transects est appliqué pour interpoler les résultats tirés de la détermination pondérée de la charge au moyen de piézomètres entièrement crépinés. La charge totale est alors calculée par interpolation entre les divers points de mesure.



**Figure 16** Illustration du modèle des transects (source: guide de Hesse).

### 5.5 Prise en compte de l'évolution temporelle

On considère usuellement un panache de pollution stationnaire pour simplifier l'estimation de la charge.

La seule étude des eaux souterraines ne suffit pas pour décrire la dynamique d'un panache de pollution (croissant, stationnaire ou décroissant). S'il y a un indice de modification temporelle (p. ex. croissant ou décroissant), il faut déterminer l'évolution du rejet de polluant sur une longue période.

### 5.6 Analyse d'erreur

L'estimation de la charge est généralement entachée d'une grande incertitude, en particulier quand l'aquifère est hétérogène (cheminements préférentiels, secteurs de concentration largement divergente), quand la perméabilité et le gradient ont été estimés plutôt que mesurés, quand d'autres paramètres entrant dans un modèle numérique ont été estimés, etc. Cela s'applique aussi bien aux modèles simples évoqués précédemment qu'aux modèles numériques du transport de polluants. C'est pourquoi il faut analyser séparément les erreurs inhérentes à tous les paramètres déterminés et tenir compte de leur influence sur le résultat final.

C'est en principe l'essai de pompage intégral qui permet d'obtenir la meilleure précision, car il appréhende l'ensemble du panache de pollution. Dans les modèles des tubes de courant et des transects, la précision des résultats dépend du nombre de points de mesure des eaux souterraines.

La détermination d'une charge de polluant doit toujours être assortie d'une discussion portant sur la fiabilité des conclusions tirées.

## 5.7 Résumé concernant la stratégie d'échantillonnage

Comme exposé précédemment, plusieurs stratégies d'échantillonnage impliquant des travaux d'ampleur différente sont applicables. Chacune d'entre elles a ses avantages et ses inconvénients. Il n'est donc pas possible d'en recommander définitivement une ici. La méthode à choisir dépend des facteurs suivants:

- but poursuivi (selon la phase de traitement d'un site contaminé);
- précision requise (analyse d'erreur);
- conditions hydrogéologiques (hétérogénéité du sous-sol).

Il en résulte les combinaisons suivantes, susceptibles d'étayer le choix d'une stratégie d'échantillonnage appropriée:

Etape du traitement d'un site contaminé	Hydrogéologie		Distance du site	
	Assez homogène	Hétérogène	En aval à proximité	En aval à distance
Investigation préalable	Pondération 1D	Pondération 1D / par secteurs	Pondération 1D / par secteurs	Pondération 1D
Investigation de détail	Pondération 2D	Multiniveau	Pondération 2D / multiniveau	Pondération 1D
Investigations plus approfondies	Pondération 2D	Multiniveau	Pondération 2D / multiniveau	Pondération 1D

**Figure 17** Illustration des combinaisons guidant le choix de la stratégie d'échantillonnage.

### Conclusion au sujet de la stratégie d'échantillonnage

- La stratégie d'échantillonnage doit être adaptée au but poursuivi et aux conditions locales.

## 6. Modèles de charge

### **Précision**

*L'annexe 1 comprend une description détaillée des possibilités de calculer la charge sous le titre « **Charge – Transfert de masse en solution – Modélisation du transfert de masse en solution** », rédigée par le professeur Yvan Rossier, HydroGeAp Sàrl, en janvier 2014. En voici un résumé succinct.*

La détermination, l'interprétation et les prévisions relatives à la charge peuvent aller d'estimations simples à la mise en œuvre de modèles complexes en passant par des bilans par cellules. Il est important de tenir compte des erreurs affectant les données utilisées. Les estimations simples et les bilans par cellules se basent sur les paramètres discutés précédemment au chapitre 5 (concentration, coefficient de perméabilité, gradient, etc.) alors que les modèles décrivent des systèmes complets. Ils aident ainsi à comprendre le site et permettent de faire des prévisions.

La modélisation simule des phénomènes physiques en résolvant des équations différentielles. L'équation de convection-diffusion appréhende par exemple les processus de convection, diffusion moléculaire, dispersion cinématique, dégradation et adsorption. Pour l'appliquer, il faut connaître le plus finement possible le régime d'écoulement, le panache de pollution et le bilan de masse. Le bilan de masse englobe la charge en amont du site et dans tous les secteurs possibles situés en aval. La charge représente donc un élément important de la modélisation.

Tout modèle requiert une étude exhaustive de l'hydrogéologie du périmètre considéré, ce qui nécessite généralement un grand nombre de sondages. La plus grande incertitude affecte généralement les cheminements de l'écoulement, qui devraient tous être décrits.

Les résultats de la modélisation peuvent être présentés sous une forme bidimensionnelle ou tridimensionnelle, en utilisant un logiciel approprié.

L'intérêt principal de la modélisation réside dans les pronostics sur l'évolution de la pollution. Elle fournit des informations importantes concernant les mesures à réaliser et la distribution des polluants à laquelle il faut s'attendre. Mais son prix élevé doit être mis en regard de l'utilité des résultats qu'elle est susceptible d'apporter. En règle générale, l'application d'un modèle, avec les données détaillées qu'il requiert, ne se justifie que dans le cas de biens à protéger d'une très grande importance (p. ex. captages de portée régionale). Il faudrait donc toujours commencer par analyser son rapport coût-utilité.

## 7. Solution envisagée pour évaluer l'incidence de la charge

*Ce chapitre décrit une démarche susceptible d'être appliquée pour tenir compte de la charge afin d'apprécier l'urgence d'un assainissement.*

### 7.1 Comparaison avec la prise en compte de la charge à l'étranger

Certains pays européens considèrent la charge comme une aide au traitement des sites contaminés. Ce chapitre examine brièvement si leur démarche peut être transposée au contexte suisse.

En Allemagne, les sites sont classés et les buts des assainissements sont fixés en combinant des valeurs de concentration et de charge. Cela implique l'existence de valeurs indicatives et de valeurs limites applicables à la charge en plus de la concentration. Comme mentionné au chapitre 3, l'OSites suisse n'en prescrit pas.

En France, notamment, les buts des assainissements sont en revanche fixés en fonction des immissions. Ce ne sont donc pas les émissions dégagées par un site pollué, mais leurs effets sur un bien à protéger (le plus souvent un captage d'eau potable) qui sont prioritaires. Le point de référence n'est ainsi pas le site lui-même et la charge n'est qu'un moyen indirect d'estimer l'incidence de la pollution sur le bien à protéger (p. ex. augmentation de la concentration dans un captage imputable au site pollué au moyen d'un modèle hydrogéologique).

Les deux approches posent des problèmes : d'une part, elles nécessitent un sous-sol sensiblement homogène du point de vue hydrogéologique et de bonnes connaissances de l'ensemble de l'aquifère ; d'autre part, elles mettent la détermination relativement imprécise de la charge sur le même plan que la détermination beaucoup plus exacte de la concentration en aval à proximité du site.

### Conclusion

Ces deux manières de considérer la charge ne sont pas transposables directement aux exigences et aux conditions suisses, généralement hétérogènes. Elles ne correspondent pas non plus aux prescriptions de l'OSites et de l'OEaux, qui servent de base intangible aux activités du groupe de travail « Charge ».

*Précision: l'annexe 2 expose ces approches d'une manière plus détaillée.*

### 7.2 Conditions posées à la solution envisagée

Le chapitre 3.2 avait stipulé que:

*« L'urgence d'un assainissement est appréciée en fonction d'une estimation de la mise en danger de l'environnement réalisée dans l'investigation de détail. La prise en compte de la charge constitue donc, du point de vue du droit régissant les sites contaminés, un des critères applicables pour estimer la mise en danger de l'environnement et pour apprécier l'urgence d'un assainissement. »*

Une condition essentielle posée à toute solution envisagée est que la charge n'est qu'un parmi plusieurs paramètres appliqués pour estimer la mise en danger de l'environnement, puis pour évaluer l'urgence d'un assainissement. C'est ainsi, par exemple, qu'une charge établie de 0,5 kg/an peut être soit insignifiante soit importante selon les conditions locales.

La solution envisagée doit donc tenir compte d'**autres facteurs** que la charge.

La solution envisagée ne doit pas conduire à un classement strict du site, un **classement sommaire** suffit. Elle doit aussi offrir une certaine **marge de manœuvre dans le traitement des cas particuliers**.

Ce classement sommaire ne peut donc pas se baser sur des considérations écotoxicologiques, mais il doit découler d'une **comparaison empirique** entre cas particuliers.

### **Conditions auxquelles la solution envisagée doit satisfaire pour être applicable**

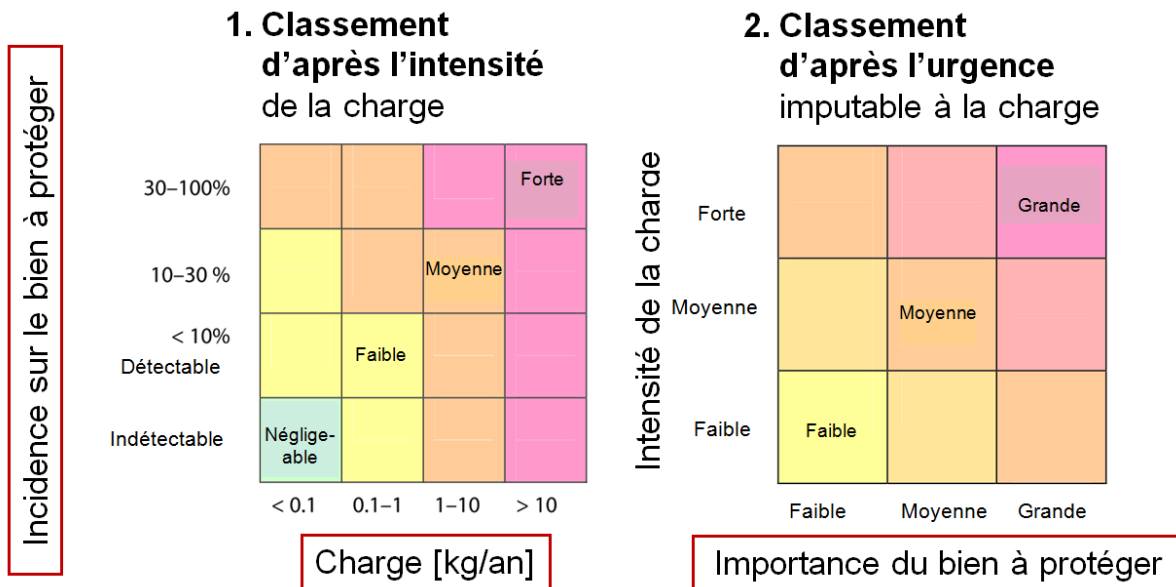
La solution envisagée ne peut être appliquée que si elle satisfait à chacune des conditions suivantes:

- La qualité des données utilisées est suffisante:
  - les données nécessaires aux calculs (données brutes) sont disponibles et plausibles;
  - l'analyse des erreurs affectant ces données est plausible et les erreurs restent compatibles avec un classement sommaire.
- Le panache de pollution n'est pas en expansion, il est stationnaire ou en cours de disparition (généralement le cas).
- La solution envisagée s'applique aux polluants provenant de la source de pollution considérée (p. ex. Per ou Tri). Leurs produits de dégradation ne sont pas pris en compte. Lorsqu'il y en a en quantités importantes, ils doivent faire l'objet d'une étude séparée.
- La pérennité de l'exploitation – actuelle ou prévue – des captages d'eau potable situés en aval du site doit être garantie. Sinon, il faudra constamment appliquer de nouvelles mesures (sur le site, dans tout l'aquifère ou au captage).

### **7.3 Modèle d'évaluation**

Le modèle d'évaluation de l'urgence d'un assainissement comprend deux étapes:

1. L'intensité de la charge polluante est déterminée à partir d'une estimation de l'ampleur de la charge et de son incidence sur le bien à protéger.
2. La combinaison de l'intensité de la charge polluante et de l'importance du bien à protéger permet de classer sommairement l'urgence d'un assainissement liée à la charge.



**Figure 18** Illustration du modèle en deux étapes appliqué pour évaluer l'urgence d'un assainissement liée à la charge.

Les différents critères sont expliqués succinctement ci-après.

## Charge

La détermination du critère « charge » et de son incertitude est décrite en détail dans les chapitres précédents. Comme les buts d'un assainissement sont fixés en regard du site pollué, c'est la charge en aval à proximité du site qui est déterminante.

Il est proposé de subdiviser la charge en quatre ordres de grandeurs: **< 0,1 kg/an, 0,1-1,0 kg/an, 1,0-10 kg/an et > 10 kg/an**. Cette différenciation, jugée pertinente pour traiter la somme des HCC typiquement utilisés Per, trichloroéthylène et 1,1,1-trichloroéthane, devrait être applicable à la plupart des sites pollués par des HCC. Il y a lieu de subdiviser différemment la charge des autres substances toxiques importantes, comme le chlorure de vinyle, en fonction de leur capacité de pollution.

Les ordres de grandeur de la charge doivent tenir compte de la précision usuelle de sa détermination au stade de l'investigation de détail. Lorsque l'erreur estimée affectant la charge dépasse ces ordres de grandeur, les données disponibles sont insuffisantes pour appliquer la solution envisagée ici.

## Incidence sur le bien à protéger

Le critère « incidence sur le bien à protéger » décrit la part de la pollution imputable au site rapportée à l'ensemble de la pollution affectant le bien à protéger. La pollution peut être exprimée en termes de charge et/ou de concentration.



Le bien à protéger et le point de référence à considérer peuvent varier largement. Ce dernier sera par exemple une section de contrôle définie à l'intérieur de l'aquifère touché ou un captage d'eau de boisson situé à distance en aval du site. Il peut aussi arriver que l'on considère des eaux superficielles recevant des eaux souterraines exfiltrées. Lorsque plusieurs points de référence sont considérés, c'est le plus défavorable qui est déterminant pour l'évaluation globale.

L'incidence sur le bien à protéger est un paramètre difficile à déterminer. Pour l'appréhender précisément, il faut généralement réaliser de nombreux forages, des modélisations, des essais de traçage et/ou des analyses isotopiques, etc. Mais des estimations sommaires basées sur la connaissance des lieux suffisent habituellement pour assigner la charge à l'une des catégories suivantes:

- **incidence indétectable**
- **< 10 % (incidence détectable mais très marginale)**
- **10 % - 30 % (incidence marginale)**
- **30 % - 100 % (incidence significative à prépondérante)**

L'évaluation de ce critère se base sur les réflexions suivantes: lorsque le site considéré est le seul émetteur de polluant dans le bien à protéger, son incidence est de 100 % et il est l'unique responsable de la mise en danger éventuelle du bien à protéger. L'assainissement du site résoudrait donc entièrement le problème affectant ce bien.

L'incidence du site considéré sur le bien à protéger est moindre lorsque d'autres sites contribuent notablement à la pollution totale ou en cas de forte pollution de fond. L'assainissement (complémentaire) du site ne peut alors résoudre que très partiellement le problème affectant le bien à protéger.

### **Importance du bien à protéger**

Le critère « importance du bien à protéger » recouvre différentes caractéristiques de ce bien qu'il y a lieu de définir de cas en cas. Outre la taille et la qualité d'un aquifère, la productivité d'un captage et son importance pour l'approvisionnement local ou régional en eau figurent notamment parmi les caractéristiques à prendre en compte. A défaut de paramètre fixe, seule une différenciation sommaire en importance **faible, moyenne ou grande** – qu'il y a lieu de justifier – peut être opérée.

Notons que cette classification est indépendante du degré de protection des eaux ( $A_u$  ou  $üB$ ), ce qui signifie qu'il n'y a pas de correspondance automatique entre secteur  $A_u$  et grande importance et entre secteur  $üB$  et faible importance.

### **7.4 Echelonnement du modèle d'évaluation**

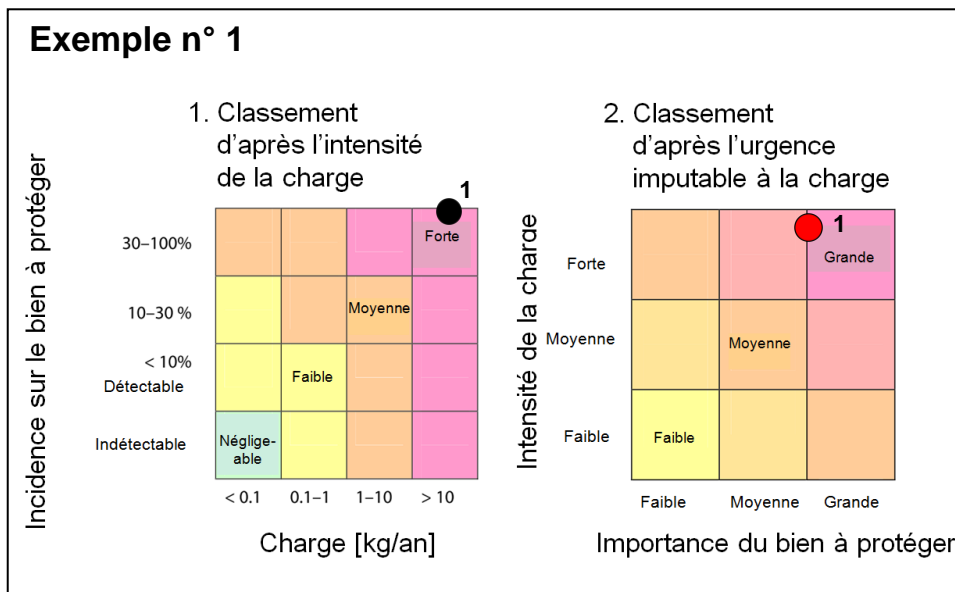
L'échelonnement du modèle d'évaluation décrit ci-dessus a volontairement été choisi graduel, principalement dans la deuxième étape (deuxième matrice). Il tient ainsi compte du fait que le deuxième et surtout le troisième critère ne sont qu'estimés.

L'échelonnement quelque peu asymétrique préconisé dans la première étape découle des réflexions qui suivent. D'une part, il tient compte du fait qu'une charge faible à très faible ne

génère pas une intensité forte seulement parce qu'elle provient entièrement du site considéré. Lorsque l'intensité est négligeable, l'assainissement ne revêt aucun caractère d'urgence. D'autre part, une charge supérieure à 10 kilos de HCC par an génère une intensité forte quelle que soit son incidence sur le bien à protéger. Il s'agit bien sûr d'une évaluation stratégique, exclusivement focalisée sur le site pollué lui-même.

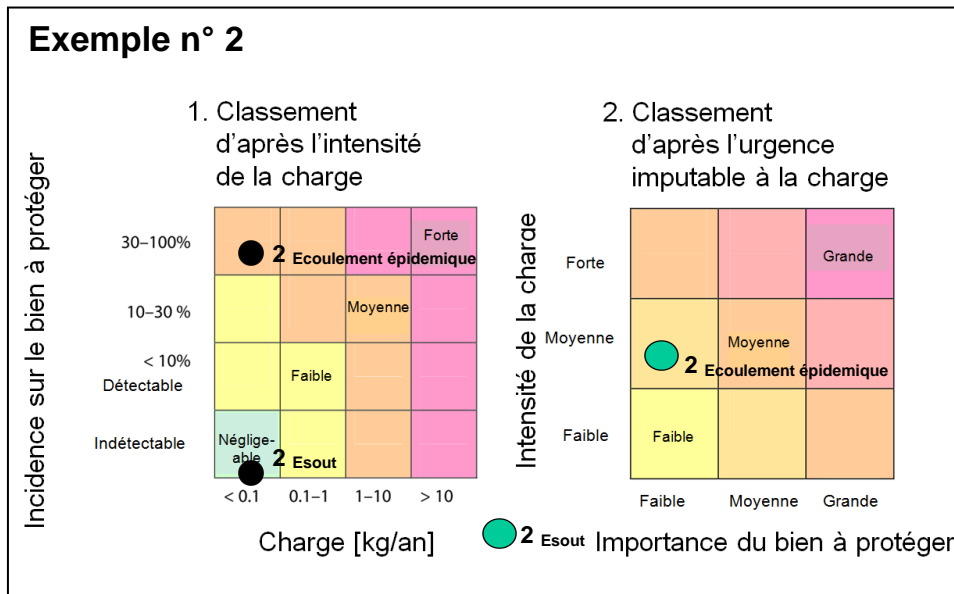
## 7.5 Exemples d'application

Les deux exemples suivants illustrent l'application de la démarche envisagée.



**Figure 19** Application du modèle d'évaluation: exemple n° 1.

Dans ce premier exemple, l'intensité consécutive à une charge de 20-40 kg/an provenant d'une seule source d'émission (incidence = 100 %) est forte. L'importance du bien à protéger étant moyenne à grande (p. ex. aquifère exploité), l'urgence d'un assainissement est donc finalement assez grande.



**Figure 20** Application du modèle d'évaluation: exemple n° 2.

Le deuxième exemple décrit un site rejetant des polluants dans les eaux d'infiltration qui atteignent un aquifère exploitable après une courte distance. Il montre que le modèle d'évaluation est applicable même lorsque l'on considère plusieurs biens à protéger. Pour une charge très faible, inférieure à 0,1 kg/an, l'urgence d'un assainissement est moyenne vis-à-vis des eaux d'infiltration immédiatement atteintes et nulle vis-à-vis de l'aquifère déjà pollué qui est touché ensuite.

## 7.6 Suite des travaux

Le modèle d'évaluation décrit ici a été discuté au sein du groupe de travail « Charge », puis présenté lors de la journée technique ChloroNet de 2013 à Soleure. Il est en train d'être validé à l'aide de cas concrets traités dans différents cantons dans le but de mieux cerner ses possibilités et ses limites.

Les résultats de cette validation et les éventuelles adaptations ou améliorations du modèle seront discutés dans le cadre de ChloroNet, puis ils seront intégrés, comme les résultats et les informations consignés dans le présent rapport, dans les prochains travaux inhérents au projet sectoriel « Gestion des risques ».

**Annexe 1: Remarques concernant la détermination de la charge – Modélisation  
d'Yvan Rossier**

HydroGeAp  
Professeur Yvan Rossier

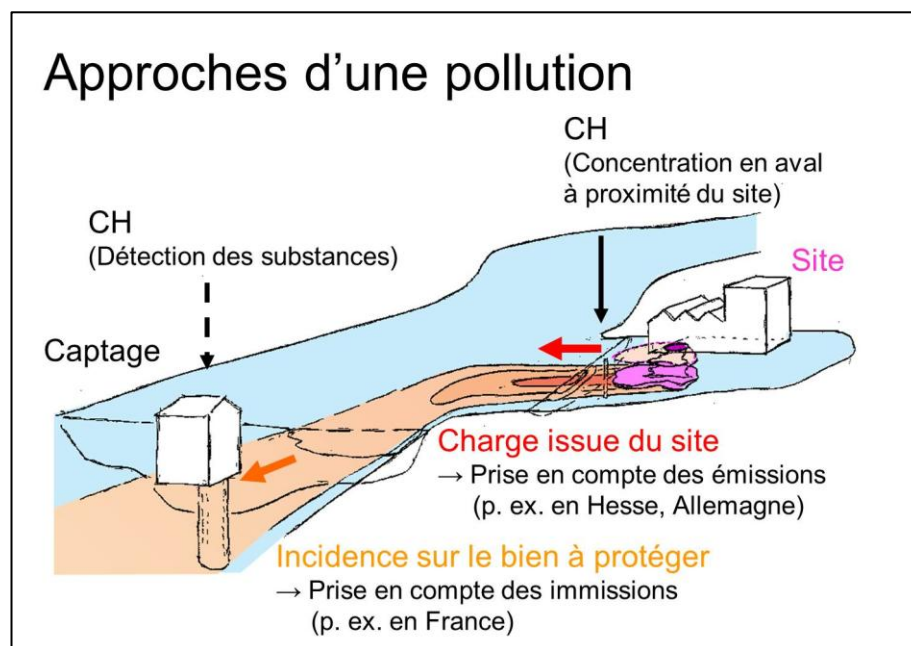
**Charge – Transfert de masse en solution –  
Modélisation du transfert de masse en solution**

Voir document séparé

## Annexe 2: Description de différents modèles d'évaluation appliqués à l'étranger

En Suisse, comme expliqué au chapitre 3, le classement des sites pollués et les étapes de traitement se réfèrent, en vertu du droit sur les sites contaminés, aux émissions de polluants dégagées par ces sites. Ce point de vue inscrit dans l'OSites, axé sur les émissions et mettant l'accent sur leur concentration, a largement fait ses preuves. Mais certains pays voisins ont adopté une approche différente:

- Exemple de l'Allemagne (p. ex. Länder de Hesse et de Bade-Wurtemberg)**  
 Le classement des sites pollués et les étapes de traitement se réfèrent également aux émissions de polluants issues de ces sites. Mais il existe des valeurs indicatives qui s'appliquent à la charge des polluants en plus de leur concentration. Le classement des sites et le but des assainissements résultent donc d'une combinaison entre des valeurs de concentration et de charge.  
 Bibliographie: Ermittlung von Schadstofffrachten im Grund- und Sickerwasser. Handbuch Altlasten, Band 3, Teil 6. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 2008.
- Exemple de la France**  
 La France privilégie la prise en compte des immissions. Le but des assainissements est en particulier fixé d'après l'incidence des pollutions sur les biens à protéger, sur leur utilisation concrète.



**Figure 21** Illustration de différentes approches suivies pour évaluer une pollution (en Suisse, en Allemagne et en France).

Le mode d'évaluation fondé sur les immissions, notamment appliqué en France, est avantageux lorsque les conditions hydrogéologiques sont semblables à l'intérieur de vastes périmètres (régions). Dans un contexte de géologie et d'hydrogéologie très variables à petite échelle comme celui de la Suisse, la démarche consistant à se focaliser sur le bien à protéger, tel

un captage d'eau potable, pour en tirer le besoin d'assainir un site distant serait affectée d'une grande incertitude et ne serait donc pas appropriée pour atteindre l'objectif visé.

La mise au même niveau des valeurs de concentration et de charge, comme en Allemagne, est incompatible avec la législation suisse. D'après l'OSites, le besoin d'assainissement est uniquement déterminé par les valeurs de concentration relevées en aval à proximité du site pollué et, d'après l'OEaux, les buts de l'assainissement se réfèrent à la qualité des eaux, elle aussi exprimée en fonction d'exigences relatives à leur teneur en polluants.

## **Conclusion**

**Les deux approches présentées ici ne peuvent pas être transposées aux conditions et aux exigences suisses.**