

Investigation des sites pollués par des hydrocarbures chlorés (HCC)

Rapport d'experts

Octobre 2016



Auteurs :
Groupe de travail « Investigation des sites pollués par des HCC »:

▶ Gabriele Büring	AWEL ZH, ChloroNet, resp. du projet	Zurich
▶ Thomas Eisenlohr	Dr. Heinrich Jäckli AG	Winterthur
▶ Manfred Flum	Villiger-Systemtechnik AG	Küngoldingen
▶ Bernhold Hahn	Peter Link AG	Ebnat-Kappel
▶ Daniel Hunkeler	Université de Neuchâtel, CHYN	Neuchâtel
▶ Antoine Indaco	CSD Ingénieurs Conseils SA	Lausanne
▶ Jürg Krebs	Office cantonal des eaux et des déchets	Berne
▶ Reto Philipp	magma AG	Zurich (Direction)
▶ Tilman Theurer	magma AG	Zurich (Rédaction)

Accompagnement OFEV :

▶ Christiane Wermeille	OFEV, section Sites contaminés	Berne
------------------------	--------------------------------	-------

Ce rapport d'experts a été rédigé en 2011 sur mandat de l'OFEV par un groupe de travail dans le cadre du projet ChloroNet et présente ainsi l'avis du groupe d'experts. Les mandataires portent seuls la responsabilité du contenu. Le rapport a été adapté en 2016 en ce qui concerne l'importance de l'échantillonnage des matières solides lors de pollutions aux HCC. Le prélèvement de ces échantillons est certes problématique en raison des propriétés des HCC, mais constitue une méthode d'échantillonnage pratique et indispensable pour la délimitation des sites pollués par des HCC. La Note d'information - Mesures visant à diminuer les sources d'erreur lors du prélèvement et de l'analyse d'échantillons de matière solide contenant des HCC (annexe 9) renvoie aux points qu'il faut respecter pour obtenir des analyses de matières solides probantes.

Table des matières

1	Contexte et objectifs	6
1.1	Contexte	6
1.2	Destinataires	7
1.3	Objectifs	7
2	Éléments de base	9
2.1	Bases légales	9
2.2	Guides pratiques et aides à l'exécution applicables aux investigations	9
3	Comportement des HCC dans le sous-sol	11
3.1	Introduction	11
3.2	Comportement d'une phase de HCC	12
3.3	Dissémination des HCC gazeux	14
3.4	Dissémination des HCC dissous.....	15
3.5	Adsorption de HCC sur la phase solide	18
3.6	Répartition pondérale des HCC dans le sous-sol (ordre de grandeur)	19
3.7	Biodégradation dans le sous-sol	19
3.8	Conséquences pour l'échantillonnage des sites pollués	19
3.9	Application de modèles numériques	20
4	Description géologique et hydrogéologique	21
4.1	Introduction	21
4.2	Buts du modèle hydrogéologique.....	21
4.3	Éléments du modèle hydrogéologique	21
4.4	Pénétration des polluants.....	23
4.5	Interprétation du modèle hydrogéologique	23
5	Investigation historique	24
5.1	Historique du site.....	24
5.2	Description du site (état actuel).....	30
5.3	Plan des périmètres à étudier et matrice d'investigation	31
6	Cahier des charges de l'investigation technique.....	34
6.1	Remarques générales.....	34
6.2	Stratégie d'investigation	34
6.3	Elaboration du cahier des charges et bases nécessaires	36
6.4	Contenu du cahier des charges.....	37
6.5	Approbation du cahier des charges	39
7	Investigation technique	40
7.1	Conception de l'échantillonnage	40
7.2	Analyse de l'air interstitiel	41
7.3	Analyse du sol et de la matière solide	44
7.4	Sondage par enfoncement et diagrapie par sonde MIP	47
7.5	Analyse du lixiviat.....	49
7.6	Analyse des eaux souterraines.....	50

7.7	Méthodes d'analyse.....	58
7.8	Incertitudes lors de l'échantillonnage et de l'analyse des HCC	58
7.9	Protocole d'échantillonnage	59
7.10	Exigences posées aux laboratoires d'analyse	60
8	Documentation de l'investigation	62
8.1	Exigences posées au rapport d'investigation.....	62
8.2	Rapport type	64
	Liste bibliographique.....	65

Annexes

Annexe 1:	Check-list « Description géologique du sous-sol »
Annexe 2:	Liste de branches et processus en usage dans ces branches qui ont utilisé des HCC
Annexe 3:	Check-list « Archives publiques »
Annexe 4:	Check-list « Sources d'information internes à l'entreprise »
Annexe 5:	Guide pour l'investigation historique
Annexe 6:	Questions spécifiques aux HCC
Annexe 7a:	Rapport type pour l'investigation historique
Annexe 7b :	Rapport type pour l'investigation technique
Annexe 8a:	Protocole de prélèvement d'eau souterraine
Annexe 8b:	Protocole de prélèvement de matière solide
Annexe 9 :	Note d'information - Mesures visant à diminuer les sources d'erreur lors du prélèvement et de l'analyse d'échantillons de matière solide contenant des HCC (version novembre 2015)

Définitions

Abkürzung	Definition d	Abbréviation	Définition f
1,1-DCA	1,1-Dichlorethan	1,1-DCA	1,1-Dichloréthane, Dichlorure d'éthylidène
1,2-DCA	1,2-Dichlorethan, Ethylendichlorid	DCE, 1,2-DCA	1,2-Dichloréthane, Dichlorure d'éthylène
1,1-DCE	1,1-Dichlorethen, 1,1-Dichlorethylen, Vinylidendichlorid	1,1-DCE	1,1-Dichloréthène, Chlorure de vinylidène
1,1,1 1,1,1-TCA	1,1,1-Trichlorethan, Ethyltrichlorid, Methylchloroform	1,1,1 1,1,1-TCA	1,1,1-Trichloréthane, Méthylchloroforme, Chlorothène
1,1,2,2-TCA	1,1,2,2-Tetrachlorethan, Acetylentetrachlorid	1,1,2,2-TCA	1,1,2,2-tétrachloréthane, Tétrachlorure d'acétylène
1,2-DCP	1,2-Dichloropropan, Propylenchlorid	1,2-DCP	1,2-Dichloropropane, Dichlorure de propylène
CCl4 (R10)	Tetrachlormethan, Tetrachlorkohlenstoff, Kohlenstofftetrachlorid	CCl4 (R10)	Tétrachlorométhane, Tétrachlorure de carbone
cDCE cis-1,2-DCE	cis-1,2-Dichlorethen, cis-1,2-Dichlorethylen	cDCE cis-1,2-DCE	cis-1,2-dichloréthène, cis-dichloréthylène
CKW	Chlorierte Kohlenwasserstoffe	HCC	Hydrocarbures chlorés
DCM	Dichlormethan, Methylendichlorid	DCM	Dichlorométhane, Dichlorure de méthylène
DNAPL	Dense non aqueous phase liquid: Dichte lipophile Flüssigphase, Dichte > 1 g/cm ³ .	DNAPL	Dense non aqueous phase liquid: Phase liquide non aqueuse dense, densité > 1 g/cm ³ .
FCKW	Fluorierte chlorierte Kohlenwasserstoffe, speziell in Kühlgeräten und in Feuerlöschanlagen eingesetzt (FCKW werden im vorliegenden Expertenbericht nicht behandelt).	HCFC	Hydrochlorofluorocarbones, utilisés dans les appareils de réfrigération et dans les installations d'extinction d'incendie (les HCFC ne sont pas traités dans ce guide pratique).
HU	Historische Untersuchung	IH	Investigation historique
LCKW	Leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe (Synonym zu CKW, im vorliegenden Kontext wird nur der Begriff CKW verwendet)	HCCV	Hydrocarbures chlorés volatils (synonyme de HCC, dans le cas présent seulement le terme HCC sera utilisé)
LHKW, HKW	(Leichtflüchtige) halogenierte Kohlenwasserstoffe: Überbegriff, umfassen neben den chlorierten Kohlenwasserstoffen zusätzlich fluorierte und bromierte Kohlenwasserstoffe	HCHV, HH	Hydrocarbures halogénés (volatils): Terme, qui comprend en plus des hydrocarbures chlorés, les hydrocarbures fluorés et bromés
LNAPL	Light non aqueous phase liquid: Leichte lipophile Flüssigphase, Dichte < 1 g/cm ³ .	LNAPL	Light non aqueous phase liquid: Phase liquide non aqueuse légère, densité > 1 g/cm ³ .
PER, PCE	Perchlorethen, Perchlorethylen, Tetrachlorethen, Tetrachlorethylen	PER, PCE	Perchloroéthène, Perchloroéthylène, Tétrachloréthène, Tétrachloroéthylène
trans-DCE	trans-1,2-Dichlorethen, Acetylendichlorid,	trans-DCE	Trans-1,2-dichloréthène, Trans-dichloroéthylène
CKW-Fahne	Zone mit vom Schadenherd abströmendem, CKW-belastetem Grundwasser (Schadstoffe gelöst und Konzentration je Einzelstoff > 1 µg/l)	Panache de HCC	Zone où de l'eau souterraine polluée avec des HCC s'écoule depuis le foyer de pollution (polluants dissous et concentration par type de substance > 1 µg/l)
TRI, TCE	Trichlorethen, Trichlorethylen	TRI, TCE	Trichloréthène, Trichloréthylène, Ethylène trichloré, Trichlorure d'éthylène, Trichlorure d'acétylène
TU	Technische Untersuchung	IT	Investigation technique
VOC	Volatile organic compound. Flüchtige organische Verbindungen: Überbegriff für organische Stoffe, die leicht verdampfen.	COV	Composés organiques volatils: sont des hydrocarbures pouvant facilement se trouver sous forme gazeuse.

Abkürzung	Definition d	Abbréviation	Définition f
VC	Vinylchlorid	CV	Chlorure de vinyle, Chloroéthylène
Phase	<p>Bereich, in dem Schadstoff als flüssiger Reinstoff vorhanden ist.</p> <p>Sie tritt entweder als zusammenhängender Phasenkörper auf einem Stauer (DNAPL) oder in Form isolierter Phasentröpfchen in Porenräumen auf.</p>	Phase	<p>Domaine dans lequel un polluant existe à l'état pur sous forme liquide.</p> <p>On la trouve soit sous la forme d'un corps continu sur un plancher imperméable (DNAPL), soit sous forme dispersée (en gouttelettes de phase isolées) dans la zone poreuse.</p>

Dans le présent guide pratique, on entend par « hydrocarbures chlorés » les hydrocarbures chlorés aliphatiques au sens de l'annexe 1 de l'ordonnance sur l'assainissement des sites pollués (ordonnance sur les sites contaminés, OSites), c'est-à-dire les hydrocarbures halogénés « classiques », généralement volatils (HCHV), y compris le 1,2-dibromoéthane. Ils seront nommés HCC dans la suite du document pour en faciliter la lecture. Celui-ci ne traite pas des composés chlorés aromatiques (p. ex. chlorobenzènes, PCB) ni des composés chlorés aliphatiques substitués par d'autres groupes fonctionnels (p. ex. amines).

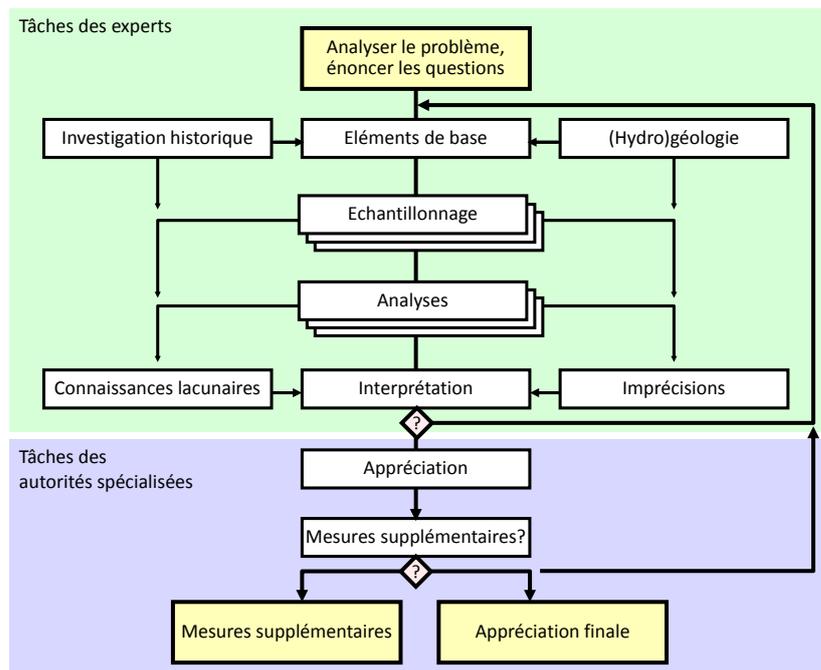
1 Contexte et objectifs

1.1 Contexte

Des hydrocarbures chlorés volatils ont été utilisés comme solvants et comme détergents dans de nombreux processus industriels et artisanaux, en particulier durant la seconde moitié du XX^e siècle. Mais les risques de rejets de HCC dans l'environnement et leur dangerosité ont été décelés tardivement. C'est pourquoi une grande partie des traitements de sites contaminés en cours en Suisse portent sur des pollutions causées principalement par des HCC, tant en nombre de cas qu'en termes d'atteintes à l'environnement.

Lors des investigations techniques – préalables, de détail ou en vue de l'assainissement – d'un site pollué par des HCC, qui impliquent la plupart du temps des analyses d'air interstitiel, d'eaux souterraines et de matière solide, l'expert doit toujours prendre en compte l'incertitude inévitable des méthodes de prélèvement et d'analyse. Cela vaut d'autant plus pour l'étude des pollutions aux HCC, car les techniques courantes de prélèvement et d'analyse génèrent des pertes de polluants volatils, qu'on peut seulement limiter.

Fig. 1:
Déroulement d'une investigation technique.



L'expert doit:

- ▶ connaître les processus industriels et artisanaux anciens et actuels qui impliquent des HCC, pour être en mesure d'identifier les sources de pollution dans leur contexte spatio-temporel lors de l'investigation historique;
- ▶ tenir compte des particularités des HCC qui découlent de leurs propriétés et de leur comportement dans le sous-sol lorsqu'il conçoit des investigations;

- ▶ estimer les incertitudes affectant l'investigation historique et les différentes méthodes de prélèvement et de mesure appliquées lors de l'investigation technique;
- ▶ connaître la situation hydrogéologique du site, en particulier le plancher imperméable dans le périmètre du site; et
- ▶ tenir compte des lacunes dans les connaissances qui entachent ses interprétations et éventuellement les mesures qu'il préconise.

Les autorités spécialisées décident, en se basant sur les résultats obtenus et documentés par l'expert, s'il faut poursuivre les investigations ou assainir le site. Si les données disponibles sont insuffisantes, elles déterminent les investigations devant encore être effectuées. Pour qu'elles puissent évaluer les résultats des recherches, il faut que les interprétations et les propositions de l'expert soient documentées clairement, tiennent dûment compte des incertitudes et signalent les lacunes dans les connaissances.

1.2 Destinataires

Le présent guide pratique s'adresse en premier lieu:

- ▶ aux bureaux d'experts mandatés pour étudier les pollutions par des HCC;
- ▶ aux autorités qui évaluent les pollutions par des HCC et ordonnent le cas échéant de nouvelles mesures en se basant sur les résultats des investigations.

Elle est également destinée:

- ▶ aux institutions qui étudient les bases scientifiques des atteintes à l'environnement dues aux HCC;
- ▶ aux laboratoires qui analysent des échantillons d'eau et de matière solide pollués par des HCC;
- ▶ aux entreprises qui proposent et développent des procédés d'assainissement de sites pollués par des HCC;
- ▶ aux détenteurs de sites pollués par des HCC (propriétaires fonciers, maîtres d'ouvrages).

1.3 Objectifs

Le présent guide pratique, qui aide à concevoir et à réaliser des investigations sur des sites pollués par des HCC, vise à:

- ▶ indiquer les informations concernant l'utilisation de HCC qui peuvent ou doivent être acquises lors d'une investigation historique;
- ▶ indiquer les informations (hydro)géologiques nécessaires pour concevoir des investigations techniques judicieuses sur un site;
- ▶ donner un bref aperçu des techniques de prélèvement et des méthodes d'analyse applicables dans la pratique pour étudier les polluants volatils contenus dans l'air interstitiel, les eaux souterraines et la matière solide;
- ▶ indiquer les possibilités et les limites d'application des différentes techniques de prélèvement et méthodes d'analyse;
- ▶ standardiser les mesures, afin qu'elles soient planifiées judicieusement et réalisées parfaitement pour être d'un apport maximum à l'évaluation des sites pollués;

- ▶ fixer les exigences minimales auxquelles la documentation des prélèvements et des analyses doit satisfaire, en prescrivant des protocoles d'échantillonnage standard et des rapports d'analyse;
- ▶ indiquer comment estimer les incertitudes entachant les mesures et comment les prendre en compte dans l'interprétation des résultats;
- ▶ fournir des aides pratiques pour l'élaboration des rapports (check-lists pour l'investigation historique, protocoles de mesure, rapports types).

La vocation première de ce document n'est pas de décrire les prélèvements d'échantillons et les méthodes d'investigation de sites pollués par des HCC sous un angle technique. De nombreux guides pratiques le font déjà. Celle-ci privilégie les aspects stratégiques à prendre en compte pour concevoir et programmer des investigations.

Le présent guide pratique se concentre sur l'investigation préalable des sites pollués par des HCC (investigation historique, élaboration du cahier des charges et réalisation de l'investigation technique).

2 Eléments de base

2.1 Bases légales

La loi fédérale du 7 octobre 1983 sur la protection de l'environnement (LPE; RS 814.0) constitue la base légale principale pour assainir les décharges et autres sites pollués par des déchets. Elle règle l'obligation d'assainir (art. 32c LPE), la prise en charge des frais (art. 32d LPE) et la taxe destinée au financement des mesures (art. 32e LPE).

Cette loi est concrétisée par l'ordonnance fédérale du 26 août 1998 sur l'assainissement des sites pollués (ordonnance sur les sites contaminés, OSites; RS 814.680) et par l'ordonnance fédérale du 26 septembre 2008 relative à la taxe pour l'assainissement des sites contaminés (OTAS; RS 814.681) du 26 Septembre 2008.

2.2 Guides pratiques et aides à l'exécution applicables aux investigations

L'OFEV a édité plusieurs aides à l'exécution ou documents de travail concernant le traitement des sites contaminés et, en particulier, l'évaluation de la mise en danger. Voici les principaux:

► [Méthodes d'analyse dans le domaine des déchets et des sites contaminés \(état 2013\).](#)

Cette aide à l'exécution décrit la marche à suivre pour analyser des échantillons depuis le prélèvement des échantillons sur le site jusqu'à l'analyse et à l'interprétation des résultats. Elle définit également l'état actuel de la technique en ce qui concerne l'assurance qualité [1].

► [Prélèvements d'eau souterraine en relation avec les sites pollués. Sites contaminés – Estimation de la mise en danger. OFEFP, 2003.](#)

Ce guide pratique présente les informations de base nécessaires pour prélever des échantillons représentatifs. Mais il n'apporte qu'une aide mineure dans le cas très spécifique des sites contaminés par des HCC [4]

► [Modèle de simulation pour l'estimation de la mise en danger : TransSim. Version 2.0. Téléchargement 2012. Sites contaminés - Estimation de la mise en danger.](#)

Modèle mathématique de simulation pour évaluer le transport des polluants dans les zones non saturées jusqu'à leur arrivée dans les eaux souterraines. TransSim ne s'applique pas très bien à l'évaluation des pollutions par des HCC, car les paramètres nécessaires pour élaborer un modèle pertinent sont généralement inconnus.

► [Sites contaminés: recenser, évaluer, assainir. OFEFP 2001.](#)

Présentation générale de la problématique du traitement des sites contaminés.

► [Cahier des charges pour l'investigation technique des sites pollués. Sites contaminés – Estimation de la mise en danger. OFEFP, 2000. \[3\]](#)

► [Aide à l'exécution pour le prélèvement d'échantillons et l'analyse de l'air interstitiel. 2015. \[2\]](#)

Des aides et des fiches pratiques ont été publiées dans le cadre du projet ChloroNet :

- ▶ [Note d'information - Mesures visant à diminuer les sources d'erreur lors du prélèvement et de l'analyse d'échantillons de matière solide contenant des HCC \(version novembre 2015\)](#)
- ▶ [Notice « Critères de délimitation et de radiation des sites pollués par des HCC ». Etat octobre 2016.](#)

Plusieurs cantons ont également élaboré différents guides ou modèles. Comme il n'est pas possible de les mentionner tous ici, chacun se renseignera selon ses besoins.

3 Comportement des HCC dans le sous-sol

3.1 Introduction

Sur les sites encore pollués par des hydrocarbures chlorés, des HCC ont très certainement été rejetés:

DNAPL = Dense non aqueous phase liquid: phase liquide lipophile dense, densité > 1 g/cm³

Cf. [Guide des HCC](#) [5]

- ▶ sous forme de phase organique non aqueuse (nommée aussi « DNAPL »), appelée ici « phase de HCC »;
- ▶ sous forme dissoute (p. ex. HCC dissous dans l'eau);
- ▶ sous forme gazeuse.

Le terrain dans lequel des HCC ont pénétré sous forme de liquide ou de vapeur représente le foyer de pollution proprement dit, à partir duquel des polluants sous forme dissoute ou gazeuse peuvent être entraînés durant une longue période par une phase gazeuse ou aqueuse. C'est pourquoi les paramètres qui contrôlent la distribution des phases de HCC revêtent une importance particulière dans l'élaboration de toute stratégie d'investigation. Le présent guide pratique commence par les discuter, puis il aborde le mode de transport et de dégradation des substances issues d'une phase de HCC.

Tableau 1:

Sélection de paramètres physico-chimiques concernant quelques HCC, les solvants toluène et benzène, une huile technique et l'eau à 20°/25° C. Pour des données propres à d'autres composés chlorés, on se référera au projet sectoriel Chloronet n° 1 [5].

Substances	Densité [g/cm ³]	Viscosité dynamique [mPa·s]	Température d'ébullition T _s [°C]	Tension superficielle [mN/m]	Solubilité dans l'eau S [g/l]	Tension de vapeur [Pa]	Constante de Henry [-]	Point d'inflammation T _F [°C]	Coefficient de diffusion moléculaire D _m [m ² /s]	
Eau	0.9982	1	100	72.75	-	3 170	-	-	-	
HCC	Trichloréthène (TRI)	1.465	0.566	86.6	29.3	1.1	10'000	0.49	aucun	7.66×10 ⁻¹⁰
	Perchloroéthène (PER)	1.62	0.9	121	32.3	0.16	2'500	0.73	aucun	8.37×10 ⁻¹⁰
	Cis-1,2-DCE	1.27	*	60	*	5.09**	28'100	0.219	6	*
	Tétrachlorométhane	1.59	*	76.7	*	0.826	14'500	1.1	aucun	*
	1,1,2,2-tétrachloréthane	1.60	*	146	*	3.27	794	0.0166	aucun	*
	1,1,1-trichloréthane	1.34	*	74	*	1.3	16'600	0.663	aucun	*
	Chlorure de vinyle	0.91	*	-13.4	*	2.8	4·10 ⁵	1.1	-78	*
	Dichlorométhane	1.33	*	40	28.1	16.9	57'500	0.117	aucun	*
	Trichlorométhane	1.48	*	61	*	8.45	25'100	0.144	aucun	*
Toluène	0.870	0.6	111	27.75	0.47×10 ⁻³	4'000	0.23	6	7.95×10 ⁻¹⁰	
Benzène	0.88	0.601	80	28.9	1.8	13'000	0.2	-11	8.59×10 ⁻⁶	
Huile technique	0.882	88.7	220	20-25***	10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁹	1-10	*	223	*	

*: aucune donnée mesurée. **: chiffres très variables dans la littérature spécialisée. ***: valable du n-octane au n-décane.

Ce chapitre se concentre sur les propriétés des HCC qui ont une influence sur leur comportement dans le sous-sol. Leurs caractéristiques générales figurent dans le « Guide des hydrocarbures chlorés » [5].

Le tableau 1 met en regard certains paramètres propres à quelques liquides pour attirer l'attention des personnes traitant des sites contaminés sur les caractéristiques du groupe des HCC.

A retenir:

- ▶ Les HCC sont de bons liposolvants, mais ils sont ininflammables.
- ▶ En ce qui concerne la dissémination des pollutions, les HCC se distinguent notamment des autres solvants par leur viscosité, leur densité et leur solubilité dans l'eau.
- ▶ Il faut connaître les propriétés physiques et chimiques des HCC pour décrire les processus les impliquant.

3.2 Comportement d'une phase de HCC

En raison de leur densité élevée et de leur nature très liquide (faible viscosité), les phases de HCC peuvent descendre très rapidement dans le terrain sous l'effet de la gravité. Elles empruntent de fines fissures dans les dalles en béton, traversent le béton lui-même et parcourent l'espace poral du sous-sol. La répartition de ces substances dans le terrain dépend

- ▶ du lieu de pénétration;
- ▶ de la quantité infiltrée;
- ▶ du degré d'hétérogénéité géologique du sous-sol à toutes les échelles, avec la variabilité de la perméabilité qui va de pair.

En terrain meuble, la géométrie des zones où la granulométrie – et par conséquent la taille des pores – varie joue un rôle essentiel.

Une phase de HCC descend préférentiellement à travers des zones de granulométrie grossière, aux pores de grande taille (fig. 2). Elle tend à s'accumuler lorsque la granulométrie des sédiments diminue, même si la taille des pores disponibles varie très peu. Cette tendance est renforcée lorsque la teneur en eau augmente, car l'eau retenue dans les matériaux fins par des forces de capillarité s'oppose à la pénétration de la phase de HCC. Lorsqu'une phase suffisamment importante s'accumule contre une couche à grain fin peu épaisse, elle risque de la transpercer. Si la couche de granulométrie fine a une extension latérale restreinte, elle peut être contournée par la phase de HCC.

A retenir:

- ▶ Les phases de HCC s'infiltrent surtout verticalement dans le sous-sol, sous l'effet de la gravité.
- ▶ Les phases de HCC qui s'infiltrent peuvent être retenues ou décalées latéralement aux zones de transitions entre couches.
- ▶ Les phases de HCC qui s'infiltrent sont déviées dans une mesure négligeable par les écoulements d'eau souterraine.

Sous l'effet ralentisseur des sédiments fins, les phases de HCC descendent souvent en cascade dans un sous-sol hétérogène. Là où une phase de HCC est retenue et déviée latéralement, une grande quantité de phase sensiblement continue (souvent nommée « cuvette de HCC ») reste sur place. En revanche, dans les zones plus perméables sujettes à une migration verticale, seules des gouttelettes isolées (souvent nommées « saturation résiduelle ») sont capturées dans l'espace poral. Ainsi, la part de la phase de HCC qui reste en mouvement diminue continuellement pendant l'infiltration. Dans certaines conditions (infiltration d'une quantité modérée de substance, zone de granulométrie fine, aquifère profond), il arrive que la migration d'une phase de HCC s'interrompe totalement avant qu'elle n'ait atteint la surface de la nappe (fig. 3a et 3b).

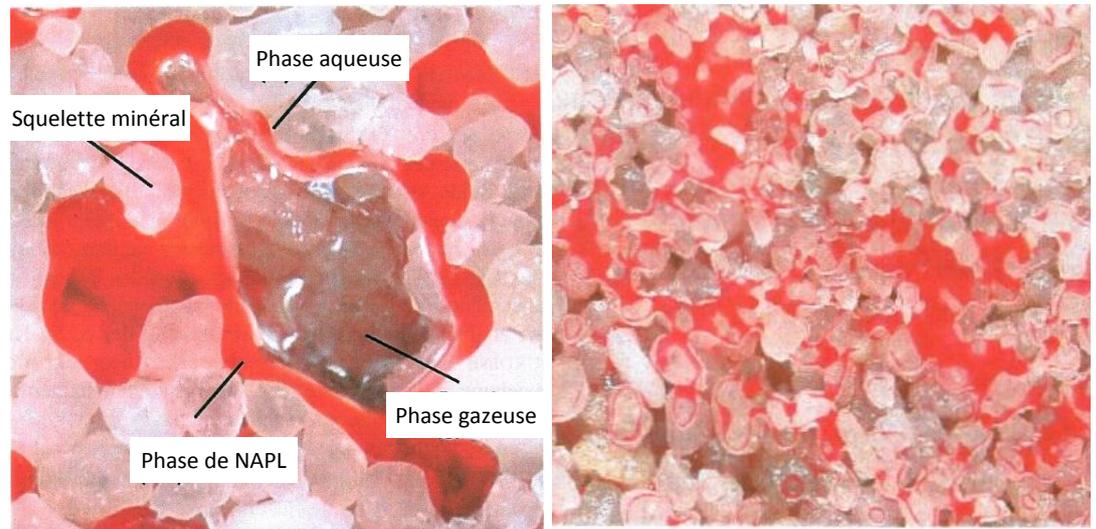
Sous la surface de la nappe, l'agencement des couches de granulométrie fine joue également un rôle crucial. Selon leur inclinaison, il arrive qu'une phase de HCC s'écoule en sens contraire de l'aquifère en raison de sa densité élevée (fig. 5c). Lorsqu'une phase de HCC atteint une roche fissurée, elle en emprunte de préférence les grandes ouvertures. Les petites fissures remplies d'eau s'opposent à la dissémination de la phase de HCC, mais leur résistance peut être vaincue en cas d'accumulation.

Conséquences pour l'investigation des sites pollués

- ▶ Les grandes quantités de HCC se trouvent surtout à la surface et à l'intérieur des couches à grain fin.
- ▶ Dans une zone non saturée relativement épaisse comprenant une alternance de sédiments fins et grossiers, il arrive que toute la phase de HCC se trouve dans la zone non saturée. Mais les eaux souterraines peuvent quand même être atteintes par des polluants entraînés par des eaux de percolation et par suite d'échanges entre l'air interstitiel et les eaux souterraines.
- ▶ Les terrains de granulométrie grossière retiennent une part moins importante des HCC s'infiltrant que les matériaux fins. Les HCC sont relativement vite dissous et évacués dans un terrain grossier, d'autant plus s'il est le siège d'un écoulement souterrain important. Il peut arriver que des couches profondes (à grain fin) soient polluées alors qu'on ne décèle pratiquement plus de composé chloré dans la zone non saturée, ni dans la partie supérieure de l'aquifère.

Cf. fig. 3 a+b
pages 15 et 16

Fig. 2: Répartition d'un polluant (en rouge) dans les pores non saturés, selon l'hypothèse de Leverett. Le polluant (ici un NAPL) sous une forme pure remplit quelques grands pores contigus (photos Winkler & Färber, 2001, non publié, et [17]).



3.3 Dissémination des HCC gazeux

La propension d'un liquide à s'évaporer est exprimée par sa tension de vapeur. Celle de la plupart des HCC est élevée. La tension de vapeur est une constante propre à chaque substance, indépendante de sa quantité.

Les HCC ayant une tension de vapeur élevée, on en trouve sous forme de gaz très concentré à proximité immédiate des phases de HCC situées dans la zone non saturée. Ces substances se disséminent dans toutes les directions par diffusion à partir du foyer de pollution, pour former un « halo » tout autour de celui-ci. L'extension de la pollution gazeuse dépend de l'ouverture des pores du terrain et de l'existence ou non de phénomènes de transport et de mélange activés par des mouvements d'air transitant par les pores.

Dans les matériaux argileux, il arrive fréquemment qu'une grande partie des pores de la zone non saturée soit aussi remplie d'eau qui, ne s'écoulant pas, entrave les mouvements d'air. Ainsi, les zones argileuses empêchent les polluants de se disséminer par diffusion et par transport actif. L'étanchéité du sol joue également un rôle, notamment lorsque le foyer de pollution est proche de la surface. Si le sol est étanche, les polluants ne peuvent pas s'échapper dans l'atmosphère et ils se disséminent d'autant plus sur les côtés. Une quantité donnée de HCC en phase liquide peut donc générer des « halos » de tailles et de formes très différentes.

Conséquences pour l'investigation des sites pollués

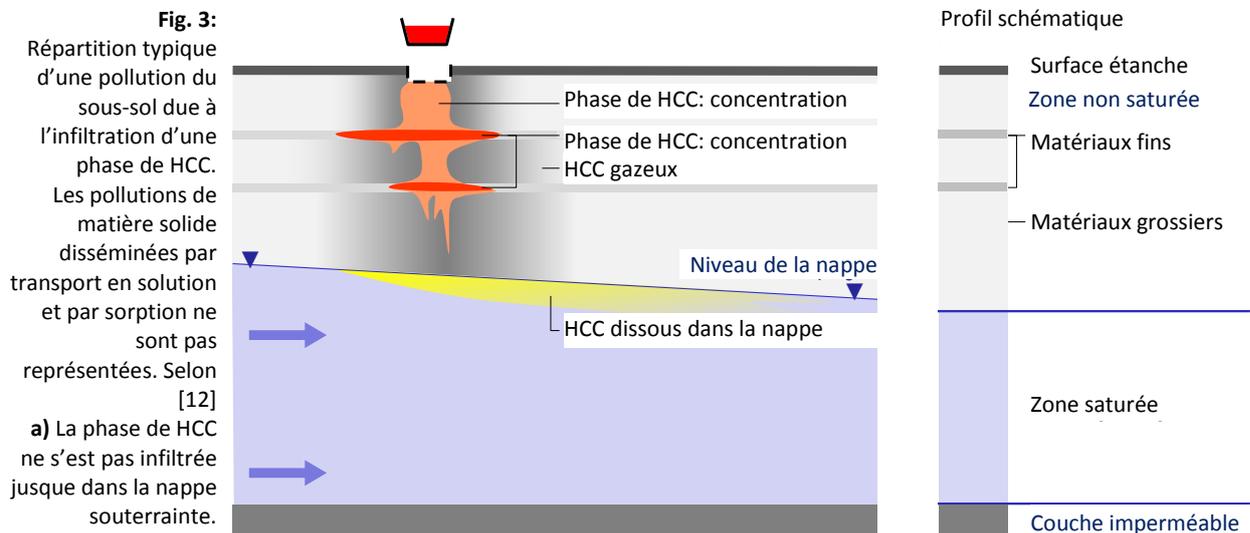
L'air interstitiel obéit à ses propres règles. La notion de « mouvement d'air interstitiel » indique que la direction et la vitesse des écoulements d'air dans les pores peuvent changer plusieurs fois par jour sous l'effet de variations de température et de pression.

- La zone polluée par des HCC gazeux peut être notablement plus étendue que la zone renfermant une phase de HCC. C'est pourquoi il est souvent plus facile de détecter un foyer de pollution en analysant l'air interstitiel plutôt que des échantillons solides du sous-sol.
- Les concentrations mesurées dans l'air interstitiel et la taille des zones souillées par des polluants gazeux ne sont pas proportionnelles à la quantité de HCC en phase liquide.

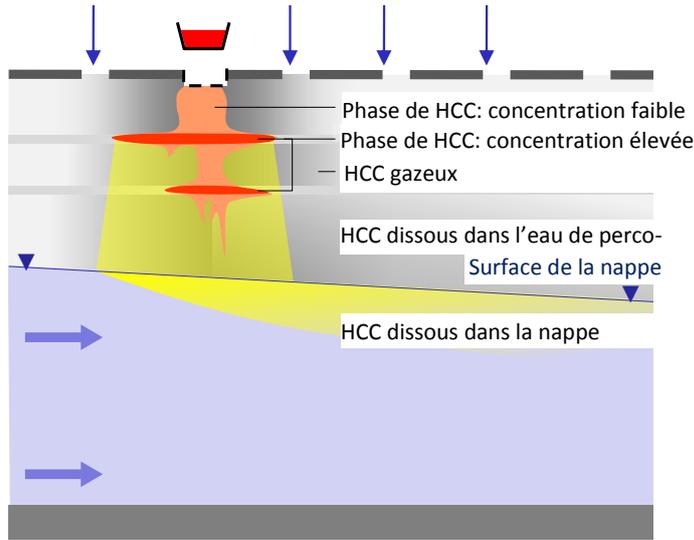
3.4 Dissémination des HCC dissous

La solubilité dans l'eau de la plupart des HCC est supérieure de plusieurs ordres de grandeur aux concentrations indicatives figurant dans l'ordonnance sur les sites contaminés (OSites) (tab. 1). Mais la solubilité maximale n'est atteinte que très localement, là où une phase aqueuse et une phase de HCC sont en contact direct, et seulement si le contact dure suffisamment longtemps.

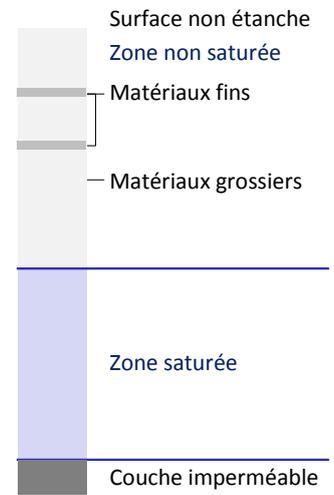
Les HCC sont dilués en aval du foyer de pollution en se mélangeant avec des eaux souterraines non polluées. Le prélèvement d'échantillons provoque une dilution supplémentaire, qui dépend étroitement de la longueur de la crépine. Pour ces deux raisons, la concentration relevée dans les points de mesure des eaux souterraines est généralement largement inférieure à la solubilité maximale (concentration de saturation), même en présence d'une phase de HCC dans la zone saturée.



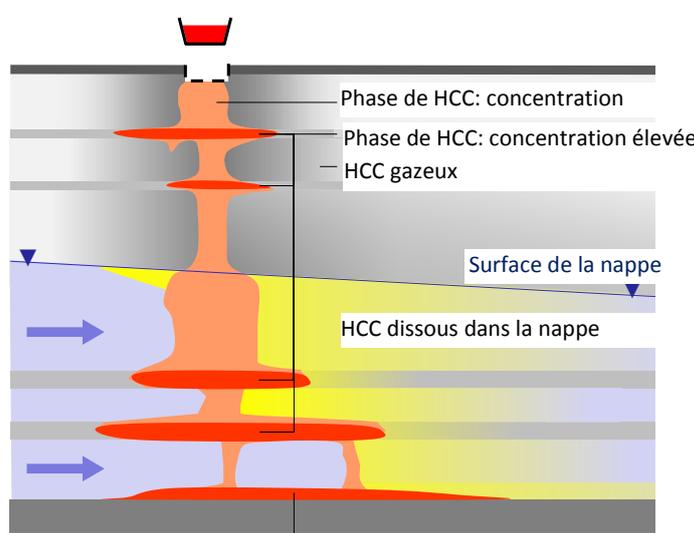
b) Des HCC dissous ont atteint la nappe souterraine.



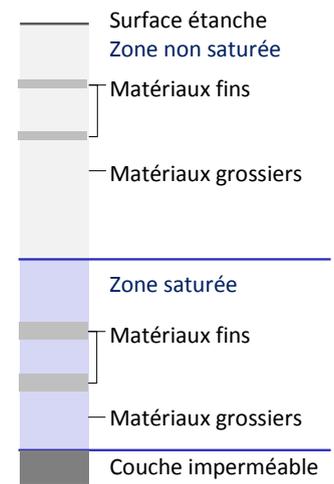
Profil schématique



c) La phase de HCC s'est infiltrée jusqu'au plancher imperméable de la nappe souterraine.



Profil schématique

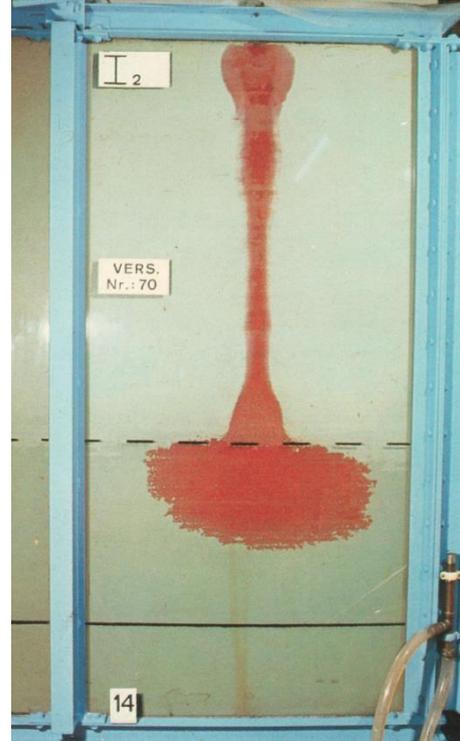


Phase de HCC formant un corps continu sur le plancher imperméable

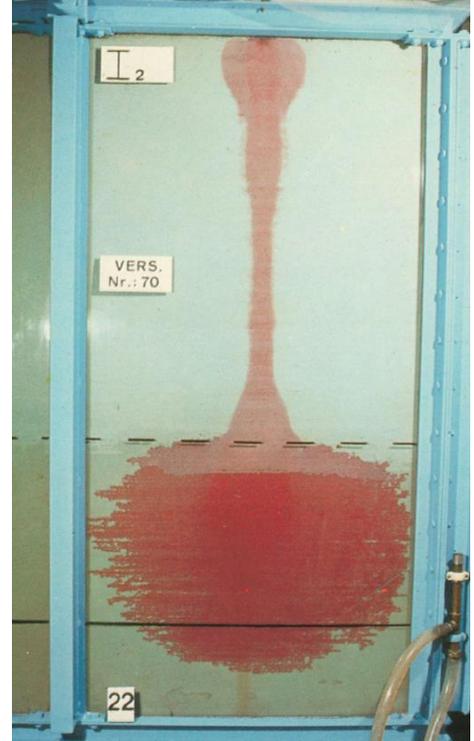
Fig. 4: Modélisation de l'infiltration de tétrachloréthène (PER)

Infiltration de 10 l de HCC dans un sable grossier, aquifère de gradient nul, hauteur de l'appareillage 1,7 m.
Tiré de [12]

A noter:
comportement différent du tétrachloréthène (PER) et du dichlorométhane, dissémination différente dans la zone non saturée et dans la zone saturée.

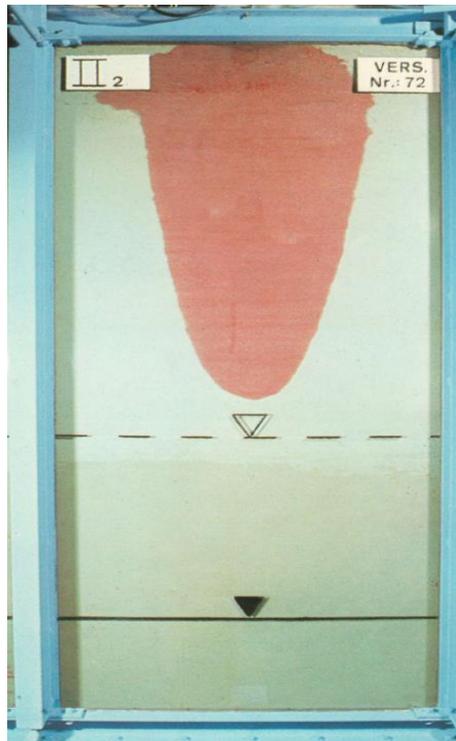


Au terme de l'infiltration (après un jour):



Modélisation de l'infiltration de dichlorométhane

Pendant l'infiltration (après 1h20'):



Au terme de l'infiltration (après un jour):



Les écoulements souterrains dispersent petit à petit les zones renfermant une phase de HCC. Dans les secteurs de granulométrie grossière, qui retiennent – relativement – peu de HCC sous forme de phase et sont traversés par un écoulement important, la phase de HCC peut être dispersée entièrement dans l'intervalle de quelques années. En revanche, les grandes quantités qui s'accumulent près des couches à grain fin se dissolvent lentement sous l'effet du faible débit. Ces zones peuvent ainsi relâcher des HCC dissous pendant de nombreuses années ou décennies.

Conséquences pour l'investigation des sites pollués

- ▶ Les résultats des prélèvements d'eau souterraine dépendent aussi de l'équipement des points de mesure (longueur de la crépine, diamètre du piézomètre).
- ▶ Des concentrations notablement inférieures à la solubilité maximale des HCC dans l'eau ne révèlent pas pour autant l'absence d'une phase de HCC.

3.5 Adsorption de HCC sur la phase solide

L'adsorption de HCC est essentiellement due à la matière organique contenue dans la phase solide. Cette fixation est réversible. La phase de HCC, les HCC dissous et les HCC gazeux sont en équilibre. Cet équilibre peut être perturbé par

- ▶ l'écoulement de la phase de HCC, de HCC dissous dans la nappe souterraine ou de HCC gazeux,
- ▶ la biodégradation de HCC, ou
- ▶ d'autres processus.

Des HCC adsorbés sur des matériaux du sous-sol peuvent être libérés par ces processus.

Ainsi, la réserve de pollution correspondant aux HCC adsorbés est le plus souvent largement inférieure à la réserve de pollution correspondant à une phase de HCC. L'adsorption de substances gazeuses ou dissoutes ralentit la dissémination des polluants, mais elle ne l'arrête pas. Lorsque la pollution est ancienne ou qu'on mesure une petite quantité de HCC, il est possible que la phase de HCC se soit entièrement évaporée ou dissoute. La pollution se présente alors surtout sous la forme de substances adsorbées, dissoutes et gazeuses, réparties diffusément dans la zone où se trouvait la phase de HCC.

On observe souvent, surtout pour les sites ayant subi une forte pollution aux HCC, une propagation latérale de la pollution dans la direction d'écoulement des eaux souterraines en raison des processus de dissolution et de sorption. Ces pollutions des matières solides, que l'on peut parfois observer sur plusieurs centaines de mètres, se concentrent souvent dans la zone de battement du niveau de la nappe ou dans les zones d'écoulement préférentiel des eaux souterraines. Il faut partir de l'idée que de grandes quantités de HCC dissoutes en concentrations élevées dans les eaux souterraines se sont écoulées vers ces zones avant l'assainissement de la source, et qu'elles ont en partie été adsorbées dans les matériaux du sous-sol qu'elles ont traversés. Lorsque la concentration dans les eaux souterraines diminue, les pollutions qui se

sont ainsi propagées peuvent à nouveau libérer des HCC dans les eaux souterraines et devenir des foyers de pollution secondaires.

3.6 Répartition pondérale des HCC dans le sous-sol (ordre de grandeur)

Les équilibres thermodynamiques indiquent que, lorsqu'une phase de HCC est présente dans le sous-sol (sous forme d'un corps continu DNAPL ou de petites gouttelettes de phase isolées), les parts de HCC dissous, évaporés et adsorbés sont inférieures de plusieurs ordres de grandeur (facteur 10^{-4} à 10^{-6}) à la part présente dans la phase de HCC. Les gouttes isolées dans les pores (saturation résiduelle) contiennent déjà, sous forme de phase, plus de 99 % pondéraux de la pollution.

A retenir:

- ▶ L'existence d'une phase de HCC n'est prouvée directement que lorsqu'une flaque de HCC est visible.
- ▶ Lorsqu'on mesure dans la matière solide des teneurs en HCC supérieures à la valeur U, on doit généralement admettre qu'une phase de HCC est présente à l'endroit du prélèvement (la plupart du temps sous forme de petites gouttelettes de phase).
- ▶ Lorsqu'on mesure dans la matière solide des teneurs en HCC inférieures à la valeur U, on ne peut pas exclure pour autant la présence d'une phase de HCC. Motif: les pertes de HCC lors de l'échantillonnage de matière solide, que l'on peut seulement en partie éviter et qui ne sont pas quantifiables.

Cf. § 7.3.2 page 45

3.7 Biodégradation dans le sous-sol

Cf. [Guide des HCC](#) [5],
§ 3.3

Le guide des hydrocarbures chlorés [5] et le guide KORA [8] comprennent une description détaillée des processus de biodégradation.

Les composés fortement chlorés comme le TRI et le PER peuvent être dégradés par un processus réducteur en conditions anoxiques. Ils échangent progressivement un atome de chlore contre un atome d'hydrogène en capturant deux électrons. Ces derniers proviennent essentiellement de matière organique naturelle ou d'hydrocarbures pétroliers. La dégradation des produits intermédiaires cis-1,2-dichloréthène et chlorure de vinyle est plus lente pour des raisons thermodynamiques et nécessite des conditions très réductrices (réduisant le sulfate ou méthanogènes). Il peut donc y avoir une accumulation de cis-1,2-DCE et de CV si le milieu est peu réducteur par insuffisance de matière organique et si les bactéries adaptées (Dehalococcoides) manquent. Lorsque de l'oxygène est à nouveau apporté par mélange avec de l'eau souterraine non polluée en aval du foyer de pollution, le cis-1,2-DCE, le CV et aussi le TRI (cométabolisme) peuvent se dégrader en CO_2 , Cl^- et H_2O [15].

3.8 Conséquences pour l'échantillonnage des sites pollués

Dans les sédiments grossiers, il n'y a en général pas de forces capillaires importantes. Pour les sédiments fins, le squelette minéral se déforme par contre beaucoup moins (le grain reste +/- intact). Lors des prélèvements de matière solide, c'est surtout pour les sédiments grossiers que l'on observe une déformation importante resp. un ameublissement du squelette minéral. Déjà de petites déformations de la matrice du sous-

sol sont à même de modifier la distribution de la porosité et de couper ainsi les éventuelles forces capillaires. Les gouttes isolées de HCC formant la saturation résiduelle peuvent alors se réunir et se remobiliser pour s'écouler sous l'effet de la gravité. Il faut alors s'attendre à des pertes plus ou moins importantes selon la constitution du sous-sol.

A retenir:

Cf. § 7.3
page 44

► Lorsqu'on prélève de la matière solide, il faut s'attendre à ce qu'une part des HCC s'écoule sous forme de phase ou s'échappe sous forme gazeuse durant l'opération, si bien que l'échantillon prélevé comprendra généralement moins de HCC que le sous-sol.

Cf. § 7.5
page 49

► Il est pratiquement impossible de remplir une colonne de lixiviation sans perte de HCC pour procéder à un essai suivant la « Directive de l'OFEP pour la lixiviation en colonne de matériaux de sites pollués selon l'ordonnance sur les sites contaminés » [1]. C'est pourquoi les tests de lixiviation fournissent au mieux des informations qualitatives en cas de pollution par des HCC.

3.9 Application de modèles numériques

L'expert qui étudie une pollution aux HCC a rarement besoin d'introduire des valeurs concrètes tirées de tableaux dans des équations pour décrire le problème, car les approches analytiques sont trop complexes. S'il doit néanmoins appliquer une méthode de calcul analytique, il tiendra compte du fait que toutes les valeurs des tableaux ont été déterminées en laboratoire avec des substances pures. Or, en pratique, on a presque toujours affaire à des mélanges de composition très variable dans le temps et dans l'espace. Il est parfois même impossible de dire si un mélange de polluants (hydrocarbures chlorés et non chlorés) est un DNAPL ou un LNAPL, donc de savoir si sa densité est supérieure ou inférieure à celle de l'eau.

Cf. § 3.5
page 18

Signalons que les modèles de conversion proposés notamment dans le projet sectoriel 1 de ChloroNet [5] ou dans la directive de l'OFEV « Prélèvement d'échantillons et analyses d'air interstitiel » [2] s'appliquent uniquement aux HCC présents sous forme gazeuse, dissoute ou adsorbée. De plus, il arrive souvent, par exemple en cas de pollution, que les HCC ne soient pas en équilibre avec leur milieu. La composante organique du sous-sol (nature et quantité) joue également un rôle important, qui ne peut généralement pas être intégré dans les modèles de calcul [6], [8].

Cf. fig. 2 page 14
Cf. § 3.3 et § 3.4
Pages 14 et 15

Le cas de HCC présents sous la forme de phase n'est pas pris en compte par les équations présentées dans les ouvrages cités plus haut. Mais, en principe, à chaque fois qu'on trouve des HCC dans l'air interstitiel ou dans les eaux souterraines, il faut partir du principe qu'il en existe aussi sous la forme de phase (même si elle est si finement répartie qu'elle ne peut pas s'écouler).

4 Description géologique et hydrogéologique

4.1 Introduction

- ▶ La constitution du sous-sol a beaucoup plus d'importance dans le cas des HCC que pour les autres pollutions. Elle influence considérablement la configuration de la dissémination, sa vitesse, la formation de dépôts, les processus de dégradation et de transformation, etc.
- ▶ En Suisse, un sous-sol hétérogène constitue la règle et non l'exception. Les expériences faites à l'étranger, où l'on trouve souvent un terrain fin et homogène, ne sont guère transposables à la Suisse. Les informations régionales (cartes géologiques, etc.) sont habituellement trop sommaires pour élaborer un modèle hydrogéologique en cas de pollution par des HCC. Il faut donc impérativement connaître l'hydrogéologie du site et disposer d'une grande expérience.
- ▶ Lorsqu'on fait des investigations sans bien connaître le terrain local, le risque d'erreur est grand (méthode inappropriée, points de mesure mal placés, détérioration due à des courts-circuits entre aquifères de charge et/ou de constitution différente lors du forage, etc.).
- ▶ Dans le cas des pollutions par des HCC, une méthode itérative s'impose: modèle hydrogéologique → investigation → vérification du modèle, éventuellement suivie d'une adaptation → investigation complémentaire si nécessaire. Le cas échéant, l'investigation préalable suit déjà cette démarche.

4.2 Buts du modèle hydrogéologique

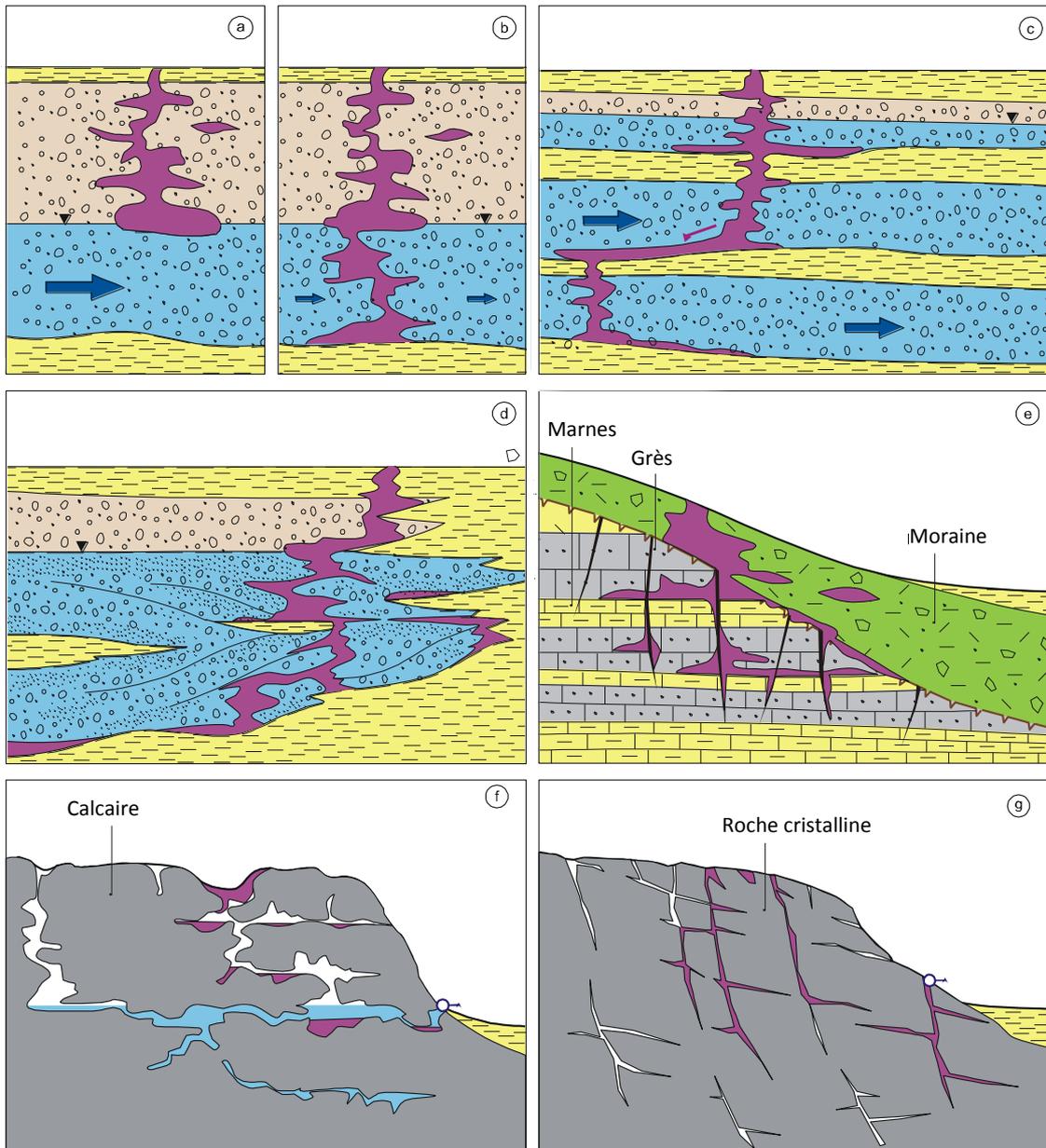
- ▶ Elaboration d'un modèle de dissémination présumé;
- ▶ base pour le choix de la bonne méthode de sondage;
- ▶ base pour le choix de la bonne densité de sondage;
- ▶ base pour le choix de bons emplacements de sondage;
- ▶ préévaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines;
- ▶ base pour le choix du bon procédé d'assainissement.

4.3 Eléments du modèle hydrogéologique

Le modèle hydrogéologique élaboré par l'expert doit donner des renseignements sur les paramètres (hydro)géologiques suivants:

- ▶ perturbations anthropiques du sous-sol (constructions, remblais, drainages);
- ▶ couches de couverture naturelles;
- ▶ aquifère;
- ▶ plancher imperméable ;
- ▶ niveaux des eaux souterraines ;
- ▶ direction d'écoulement des eaux souterraines ;
- ▶ potentiel des eaux souterraines ;
- ▶ perméabilité.

L'annexe 1 comprend une check-list utilisable pour élaborer le modèle hydrogéologique.

**Fig. 5:**

Représentation très simplifiée de l'infiltration d'une phase de HCC dans différentes formations géologiques (sont seulement représentées les zones où la phase de HCC se propage) :

- Aquifère alluvial graveleux: taux d'infiltration faible, écoulement de l'aquifère rapide.
- Aquifère alluvial graveleux: taux d'infiltration élevé, écoulement de l'aquifère lent.
- Aquifères superposés: les HCC peuvent se propager à la surface d'un niveau imperméable en sens contraire de l'aquifère, les niveaux imperméables minces peuvent être transpercés à leurs points faibles.
- Bordure hétérogène d'un aquifère graveleux: la constitution des couches à petite et à grande échelle influence considérablement la configuration de la pollution par des HCC.
- Moraine sur molasse: les HCC peuvent pénétrer dans la molasse en empruntant des fissures, zones altérées et couches poreuses (p. ex. grès).
- Aquifère karstique: les HCC se propagent dans des canaux karstiques; la configuration de la pollution est très complexe, donc très difficile à prévoir.
- Aquifère fissural: les HCC se propagent dans des zones faillées et fissurées; la configuration de la pollution est complexe, donc difficile à prévoir.

4.4 Pénétration des polluants

En sus des facteurs hydrogéologiques, le mode d'infiltration des HCC et son emplacement influencent considérablement la dissémination de la pollution. Les facteurs suivants jouent un rôle essentiel:

- ▶ Emplacement superficiel (p. ex. suintements), souterrain (p. ex. canalisations)
- ▶ Mode concentré (p. ex. puits perdu), diffus (p. ex. pénétration de gaz)
- ▶ Fréquence pénétration unique (p. ex. accident), répétée, continue (p. ex. fuites)
- ▶ Quantité taux d'infiltration élevé ou faible.

Cf. fig. 5 La figure 5 présente quelques configurations typiques d'infiltration de HCC, dans différents contextes (hydro)géologiques.
page 22

4.5 Interprétation du modèle hydrogéologique

Dans ce contexte, on entend par modèle hydrogéologique des réflexions conceptuelles concernant la situation hydrogéologique et non pas des modèles numériques.
Cf. [6].

L'interprétation du modèle hydrogéologique n'est généralement pas univoque, car on connaît rarement tous les facteurs jouant un rôle et certains d'entre eux s'influencent réciproquement. S'il est impossible de distinguer clairement des situations types, on peut néanmoins tirer les conclusions générales suivantes:

- ▶ un aquifère est d'autant moins vulnérable que le sol et les couches superficielles de granulométrie fine sont épais, argileux et homogènes. Sa vulnérabilité est également moindre en présence de matière organique et lorsqu'il est profond;
- ▶ le sol et les couches superficielles de granulométrie fine sont souvent enlevés ou traversés par des conduites et des éléments de construction dans les zones bâties;
- ▶ lorsque les matériaux du sous-sol sont essentiellement fins et hétérogènes, la configuration des pollutions par des HCC est souvent extrêmement complexe, donc difficile à prévoir, ce qui exige une grande densité de sondages;
- ▶ lorsqu'un aquifère est mince et globalement peu perméable, le danger de formation d'un dépôt augmente. C'est notamment le cas lorsque des HCC pénètrent rapidement dans le sol et qu'un niveau peu perméable en laisse passer une partie seulement (p. ex. fissures, grès poreux, horizon sableux dans une moraine, etc.);
- ▶ de légères différences de perméabilité (p. ex. graviers de teneur variable en sable et en limon) suffisent pour retenir de petites quantités de HCC sous forme de phase. Il est donc possible, en cas de pénétration lente de HCC, que le plancher imperméable ne soit pas atteint même si l'aquifère est perméable;
- ▶ une petite quantité de HCC sous forme de phase accumulée dans un aquifère profond d'écoulement rapide est relativement vite dissipée (en quelques années) dans les eaux souterraines. Elle peut en revanche subsister plusieurs dizaines d'années sur et dans les niveaux peu perméables, pour rejeter lentement des HCC dissous.

5 Investigation historique

5.1 Historique du site

L'investigation historique du site est un préalable essentiel à toute investigation technique pertinente.

La préparation et la réalisation de l'investigation historique sont traitées sous un angle général dans l'aide à l'exécution [3] et dans diverses notices, guides et checklists diffusés par les autorités cantonales compétentes. Le présent guide pratique ne revient pas sur ces généralités.

Les renseignements consignés dans le cadastre des sites pollués correspondent à l'étape initiale de l'acquisition des informations nécessaires. En général, ils ne satisfont pas aux exigences posées aux investigations historiques.

5.1.1 Où a-t-on éventuellement utilisé des HCC?

Le « Guide des hydrocarbures chlorés (HCC)- Propriétés et comportement dans l'environnement » [5] fournit à la section 1.2 un aperçu des applications possibles de HCC, classées par branches et par processus.

En Suisse, des HCC ont été utilisés en quantités industrielles depuis les années 1930. Les trois propriétés essentielles des substances de ce groupe – peu inflammables, très volatiles et dissolvant très bien les hydrocarbures utilisés comme lubrifiants – expliquent leurs applications principales dans l'industrie, comme détergents, dégraissants et additifs volatils aux solvants. Ayant longtemps ignoré qu'ils menacent la santé et l'environnement, on a eu tendance à gaspiller ces solvants. Dans les années 1970, on pensait encore qu'un béton précontraint représentait une barrière infranchissable pour les HCC et que les solvants suintants hors des installations s'évaporaient entièrement.

La compilation des pollutions aux HCC connues en Suisse indique qu'on peut globalement répartir leur origine selon les groupes suivants:

On trouvera notamment dans le document [10] une description détaillée des potentiels de contamination typiques des branches concernées.

- ▶ nettoyage chimique (y compris dépôts et installations périphériques);
- ▶ dégraissage industriel (y compris dépôts et installations périphériques);
- ▶ processus utilisant des solvants avec ajout de HCC (fabrication de peinture, industrie chimique, autres nettoyages);
- ▶ fabrication, préparation et stockage de HCC.

On trouve aussi des décharges contenant des déchets qui renferment des HCC. Ce thème n'est toutefois pas approfondi dans le cadre de ce guide pratique.

5.1.2 Informations générales

Lors de l'investigation historique, il faut impérativement acquérir des informations exhaustives et les documenter clairement. La première étape consiste généralement en une recherche dans les archives. Puis on visite le site.

L'expérience montre que le budget dont disposent les experts pour procéder à l'investigation historique est la plupart du temps modeste par rapport aux informations qu'on peut en tirer. Or ses résultats sont essentiels pour concevoir judicieusement l'investigation technique beaucoup plus onéreuse qui s'ensuit et pour répartir les frais d'investigation et d'assainissement le cas échéant. Dans le cadre de l'investigation historique, il y a lieu de recenser aussi exhaustivement que possible les affectations successives et les différents propriétaires du site. Il faut également exposer en détail l'évolution spatio-temporelle des différents processus polluants qui ont été appliqués sur le site. Si, pour des raisons de coûts, l'on axe trop les recherches sur les utilisations actuelles, on risque de passer à côté d'activités passées et par conséquent à côté d'importants foyers de pollution, bien que les informations les concernant soient généralement accessibles.

Sources d'information et interrogation de témoins importants

La check-list de l'annexe 3 regroupe des informations acquises auprès des autorités et d'autres instances publiques (archives). Si nécessaire, on consultera aussi des documents de l'entreprise concernant l'historique du site et le déroulement des processus. La reconstitution claire et complète des utilisations de HCC est grandement facilitée si le détenteur du site et les autres intéressés font preuve d'une bonne collaboration.

Une fois les informations rassemblées, il faut les évaluer brièvement: l'expert apprécie si les sources exploitées sont adaptées au problème posé et si les renseignements recueillis sont suffisants pour les interprétations futures. Le cas échéant, il explique pourquoi il n'est pas nécessaire de faire des recherches supplémentaires, éventuellement coûteuses. Les lacunes entachant l'investigation historique doivent être indiquées explicitement. Il peut arriver que les enseignements tirés lors d'étapes d'investigation ultérieures obligent de compléter l'investigation historique (processus itératif).

Cf. fig. 1
page 6

Guide général de l'investigation historique

L'annexe 5 comprend une liste de points spécifiques à étudier. L'énumération n'est pas exhaustive, car on ne peut pas détailler ici certains aspects propres à quelques branches importantes dans la problématique des HCC (p. ex. entreprises textiles, usines à gaz, etc.).

5.1.3 Questions propres aux HCC

Potentiel de pollution: exploitation impliquant des HCC

Des HCC ont-ils été utilisés sur le site?

Le premier indice, essentiel, de l'utilisation de HCC provient de l'imputation du site à un secteur d'activité ou, plus précisément, à un ou plusieurs processus. Les deux grands secteurs employant presque toujours des HCC, soit

- ▶ nettoyage chimique et
- ▶ dégraissage industriel

ont déjà été cités. La situation est moins tranchée lorsqu'un processus implique des substances qui peuvent mais ne doivent pas forcément contenir des HCC. Mentionnons par exemple la peinture, la teinturerie et l'imprimerie. Aujourd'hui comme hier, une partie des peintures et des pâtes est exempte de HCC. C'est pourquoi les substances utilisées dans l'entreprise ou dans le processus concerné doivent être précisées lors de l'investigation historique. L'expert détermine alors si elles contiennent des HCC.

Exemples dans le [guide des HCC](#) [5]:
fiches techniques

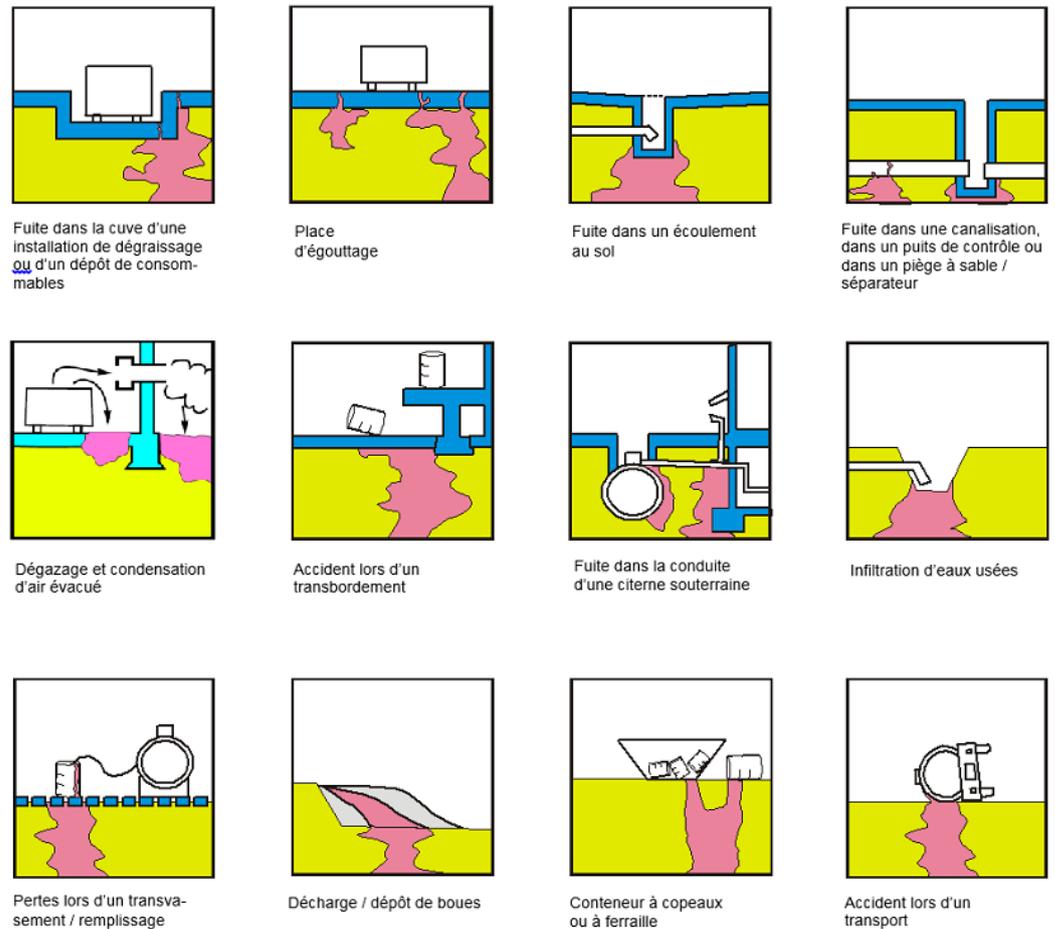
La disparité des appellations – scientifique (nom chimique), commerciale ou familière – des HCC pose aussi un gros problème. Souvent, la recherche d'informations ne révèle que des noms triviaux.

Pour pouvoir évaluer le potentiel de pollution dû à une entreprise ayant utilisé des HCC, il faut inventorier et documenter les éléments suivants lors de l'investigation historique:

Questionnaire
détaillé à l'annexe 5

- ▶ substances utilisées dans leur contexte spatio-temporel (appellation chimique);
- ▶ durée de l'utilisation;
- ▶ emplacement de l'utilisation;
- ▶ mode d'utilisation (processus, système ouvert ou fermé);
- ▶ quantités mises en œuvre et stockées, pour chaque substance;
- ▶ réserves, dépôts;
- ▶ élimination des déchets et des substances usagées;
- ▶ accidents d'exploitation ou de transport impliquant des HCC.

Fig. 6:
Voies de rejet de
HCC dans le sous-
sol, selon les
particularités du
site.



Rejets possibles de HCC

Des HCC ont-ils pu pénétrer dans le sous-sol?

Comme les HCC traversent le béton sans difficulté, l'étanchéité du sol joue un rôle crucial. La bonne question est donc la suivante:

L'étanchéité était-elle suffisante durant toute la période pendant laquelle des HCC ont été utilisés?

De nombreuses expériences indiquent que seule une cuve en acier inoxydable peut être considérée comme suffisamment étanche. En revanche, il a été démontré que la plupart des peintures protectrices n'assurent pas une étanchéité satisfaisante. La présence d'une cave atténue le problème, mais on a constaté que les HCC peuvent atteindre le sous-sol en traversant plusieurs étages (p. ex. en empruntant une tuyauterie noyée dans une paroi).

A-t-on envisagé toutes les voies de rejet possibles (air évacué, eaux usées, eau de contact, installations périphériques, déchets, etc.)?

Cf. fig. 6
page 27 Cette question doit être étendue à tous les emplacements susceptibles de renfermer des HCC. Le nombre d'aspects à étudier varie en fonction de la taille et de la nature

de l'entreprise concernée. Les schémas de la figure 6 donnent une vue d'ensemble – non exhaustive – des cheminements pouvant être empruntés par les rejets de HCC.

Cf. check-list
annexe 6

Pour étudier les principaux types de sites (nettoyage chimique et dégraissage industriel), l'annexe 6 propose un questionnaire sous la forme de check-list. Cette liste sert aussi à traiter les processus d'impression, de teinturerie, de peinture, d'injection, d'extraction, d'imprégnation, etc.

Catalogue de questions spécifiques au nettoyage chimique

Dans le cas des nettoyages chimiques, il faut tenir compte de la nature et de l'emplacement des stocks de détergents en plus des machines à laver elles-mêmes. Exemple: un fût de PER posé à côté d'une machine. L'évacuation d'air située dans une paroi extérieure ou sur le toit d'un bâtiment et le lessivage de cet air par les eaux météoriques (infiltration directe ou via le drainage du terrain et d'éventuelles autres conduites) sont aussi des voies de rejet importantes.

Par le passé, le charbon actif usagé (adsorbant) était rarement remplacé en dépit des prescriptions à ce sujet.

Cf. check-list
annexe 6

Eau de contact: l'humidité présente dans les vêtements est séparée du PER lors du lavage, puis elle est évacuée après décantation ou distillation. Cette eau est saturée en HCC. Autrefois, elle était systématiquement rejetée dans les canalisations publiques. Outre les défauts d'étanchéité de ces canalisations, la qualité des matériaux utilisés pour les regards et les tuyaux (s'ils sont en ciment ou en béton) joue un rôle important. Des défauts d'étanchéité apparaissent notamment lors d'un tassement des canalisations. Lorsqu'elles présentent de tels défauts, il faut s'attendre à ce que leurs environs soient aussi pollués par des HCC.

Catalogue de questions spécifiques au dégraissage industriel

Les bains utilisés pour le dégraissage peuvent tenir dans une petite cuve ou faire plusieurs centaines ou milliers de litres. Les pièces sont parfois dégraissées à la main. Dans ce cas, on utilise par exemple un petit bidon ou un spray ainsi qu'un chiffon ou encore une cuvette de quelques litres posée sur une table.

Mais les installations de dégraissage proprement dites contiennent souvent plusieurs centaines de litres (« baignoires » ou plus volumineuses). Adaptées aux pièces usinées, elles sont posées par terre ou enfouies dans le sol. Autrefois, les pièces à dégraisser étaient généralement plongées dans le bain à l'intérieur d'un panier ou suspendues à un crochet. Une fois retirées, elles s'égouttaient au-dessus de la cuve, puis souvent à côté de celle-ci.

Les anciennes machines étaient ouvertes et l'air ambiant n'était pas évacué. Puis on a monté un dispositif d'extraction d'air ou d'aération du local. L'air extrait était évacué par le toit ou à travers la paroi la plus proche. A l'heure actuelle, les installations sont *fermées*, elles comportent un dispositif d'extraction d'air et la plupart d'entre elles sont équipées d'un système de distillation du solvant.

Fig. 7:

- a) A gauche:
ancienne
installation de
dégraissage à la
vapeur.
- b) A droite:
machine de
nettoyage pilotée
électroniquement.



Les installations de dégraissage au PER des années 1960 à 1980 avaient typiquement une capacité de 500 à 750 litres. Elles subissaient habituellement des pertes, surtout dues à l'évaporation, d'environ 25 kilos par jour. Les entreprises de taille moyenne consommaient couramment 100 kilos de PER par semaine ou un fût de 200 litres par mois. Elles achetaient ainsi 5 à 15 tonnes de PER par an. Dans les grandes entreprises, on pouvait même multiplier ce chiffre (jusqu'à 40 tonnes par an). Ces valeurs expliquent pourquoi des pertes continues de quelques pour cent ou quelques pour mille passaient inaperçues ou étaient jugées insignifiantes par rapport aux pertes par évaporation.

Cf. check-list
annexe 6

Il ressort de cette comparaison que le dégraissage au moyen d'une installation présente un risque bien plus important que le dégraissage à la main. Si les pièces étaient dégraissées autrefois à la main ou avec un chiffon, il n'est pas nécessaire de poursuivre les investigations dans les cas bien documentés sans événement particulier (p. ex. accident). L'essentiel ici est d'indiquer de manière fiable la nature et la quantité des produits nettoyants utilisés sur toute la durée de l'exploitation et de préciser le devenir des déchets.

Concernant les grandes installations, il ne faut pas évaluer seulement leur emplacement, mais aussi leurs environs (égouttage) et l'évacuation d'air vers l'extérieur, ainsi que, le cas échéant, les installations de retraitement, zones de transbordement, réserves de HCC, etc.

Confirmation des informations recueillies

L'expert doit signaler aux personnes de référence qu'elles sont tenues de fournir des renseignements en vertu de l'art. 46 LPE. Les informations sont plus fiables lorsqu'elles sont attestées par écrit. Aussi est-il recommandé de faire confirmer les renseignements obtenus, par exemple en faisant contresigner l'investigation historique.

5.1.4 Discussion à propos des cas mineurs (« bagatelles »)

L'expérience enseigne que la probabilité et l'ampleur des pollutions aux HCC n'augmentent *pas* en fonction de la quantité utilisée: des contaminations importantes ont aussi été trouvées après un usage de courte durée et auprès de petits établissements.

A retenir:

- ▶ En cas de pollution par des HCC, aucun critère basé sur les quantités utilisées ne peut être invoqué pour définir un cas mineur.

On peut en revanche s'appuyer sur une description claire et complète des utilisations de HCC pour recommander d'arrêter l'étude d'un site. Mais cela n'est possible que si tous les points essentiels ont été pris en considération et documentés lors des recherches et s'il ne reste aucune lacune déterminante au terme de l'investigation historique.

Par exemple, le fait de prouver que le dégraissage a toujours été effectué à la main, en utilisant seulement quelques litres de produit nettoyant par an, permet de diminuer la probabilité d'une pollution importante. Mais ce genre d'argument n'est pas suffisant pour retirer un site du cadastre des sites contaminés.

5.2 Description du site (état actuel)

Si l'historique du site concerne surtout les flux de substances et les conditions prévalant lorsque des HCC ont été utilisés, la description du site porte sur l'état actuel des ouvrages situés dans l'aire d'exploitation. Cette dernière est particulièrement importante lorsque l'expertise ne bénéficie d'aucun renseignement concret fourni par des archives ou par des personnes de référence.

Dans ce cas, l'expert doit s'efforcer d'établir, en fonction des caractéristiques des ouvrages, si des HCC ont pu être utilisés. Le cas échéant, il en tiendra compte dans l'investigation technique, même si l'investigation historique n'a livré aucun indice concret dans ce sens (utilisation/processus primaire, stockage intermédiaire, déchets). Les caractéristiques des ouvrages indiquent en tout cas les cheminements pouvant être empruntés par des HCC.

Les critères suivants aident à décrire l'équipement du site en fonction de l'objectif de l'étude. L'expert doit en tenir dûment compte lors de sa visite des lieux et les documenter dans son rapport d'investigation:

- ▶ l'équipement des bâtiments (cuves, bassins, carrelages, ventilateurs, etc.) témoigne-t-il de l'utilisation de liquides? Si oui, à quoi ont servi ces installations? En cas de doute, on part du principe que des procédés par voie humide impliquant notamment des HCC ont été appliqués sur le site;
- ▶ des conduites ou autres installations indiquent-elles que des produits ont été transportés à l'intérieur du bâtiment ou du périmètre? Si oui, quels pouvaient être ces produits compte tenu des renseignements obtenus jusqu'ici? Les conduites sont-elles isolées (transport possible de substances chaudes ou de vapeur)? Le cas échéant, des objets ont été lavés à chaud et on prendra le dégraissage en considération;
- ▶ les regards doivent être ouverts et les puits inspectés lors de la visite des lieux. On effectuera au moins un contrôle visuel et olfactif et si nécessaire une analyse du contenu des puits et des dépotoirs;

Résumé des exigences posées à la description du site: cf. « Rapport type pour l'investigation historique » à l'annexe 7

- ▶ trouve-t-on des indices révélant que le site renfermait autrefois des équipements tels que ceux cités plus haut? Exemples: consoles longeant le sommet de parois, sur lesquelles des conduites ou un réservoir surélevé reposaient éventuellement; revêtement du sol absent ou réparé témoignant de la rupture d'un bassin, etc.;
- ▶ l'altération de la couleur ou l'odeur dégagée par le sol ou par un ouvrage témoigne-t-elle d'un procédé par voie humide? Si oui, comment peut-on expliquer cette altération ou cette odeur?
- ▶ quel est l'état général des emplacements où des procédés ont été mis en œuvre (nature du sol, application éventuelle d'une nouvelle couche, étanchéité, peinture protectrice, etc.)?
- ▶ le cas échéant, description des défauts d'étanchéité (fissures, tassements, écoulements au sol, rigoles, etc.) pour déterminer (ultérieurement) les voies de rejet possibles;
- ▶ infrastructures souterraines, telles que conduites, canalisations ou citernes enterrées. Sont concernés non seulement l'emplacement des procédés mis en œuvre, mais également les autres secteurs de l'entreprise;
- ▶ étanchéité des zones extérieures, surtout lorsque l'air ambiant était aspiré.

(Cette liste n'est pas exhaustive.)

5.3 Plan des périmètres à étudier et matrice d'investigation

5.3.1 Interprétation et visualisation des résultats

Les résultats de l'investigation historique doivent être consignés dans un plan séparé, permettant de visualiser les informations obtenues à propos du site:

- ▶ Où se trouvait l'application principale de HCC (emplacement des procédés mis en œuvre)?
- ▶ Où a-t-on manipulé des HCC (transvasement, stockage, déchets, installations périphériques, etc.)?
- ▶ Quels cheminements ont (éventuellement) été empruntés par des HCC (suintements, fuites, air évacué, eaux usées, canalisations, etc.)?
- ▶ Y a-t-il des raisons d'écarter une pollution (=risques improbables) (par ex. confinement suffisant, installations modernes, présence de caves, flux de substances trop faible, etc.)?
- ▶ Evolutions temporelles, contexte spatio-temporel.

5.3.2 Matrice d'investigation

L'investigation technique est préparée sur la base d'une matrice d'investigation synthétisant les plans et les résumés de l'investigation historique [3].

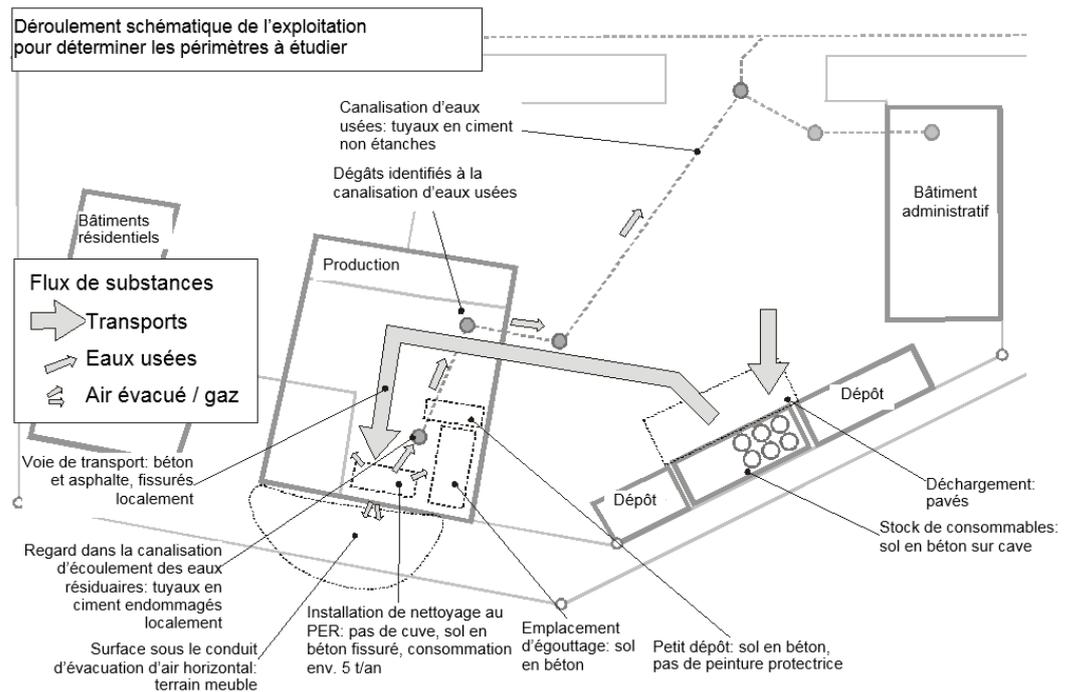
Tableau 2:

Exemple de matrice d'investigation.

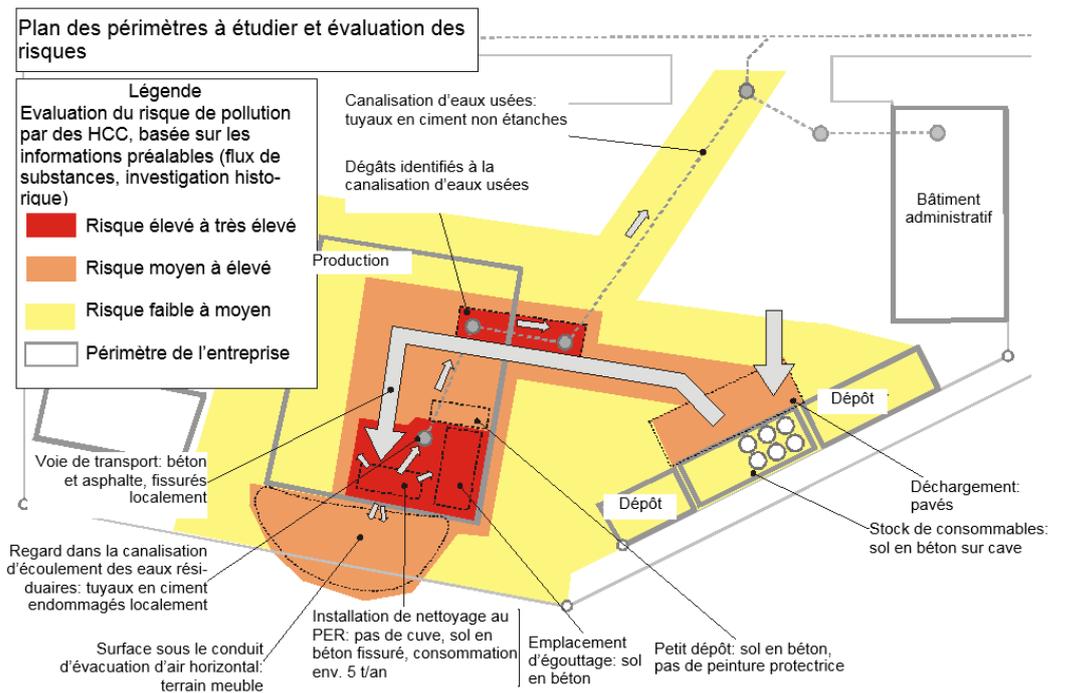
Secteur	Période (de-à)	Activité	Substances polluantes utilisées	Polluants éventuellement présents	Localisation probable de la contamination	Voies de dissémination importantes	Qualité des informations
Exemple:							
A: Installation de nettoyage au PER	De 1958 à 1978	Atelier mécanique, dégraissage des pièces usinées dans une cuve ouverte	PER: Cuve de 50 l, consommation 200 l/an	PER, TRI, év. produits de dégradation jusqu'au CV	a) sous le radier b) devant la paroi extérieure (sortie du conduit d'aération)	a) air interstitiel b) air évacué après condensation, air interstitiel et eau de percolation	Sûres: cf. chap. ... de l'IH
B: ...							
C: ...							
...							
Reste du périmètre							

Fig. 8:
Exemple de plan des périmètres à étudier. Visualisation des flux de HCC dans une entreprise:

a) Evaluation graphique de l'exploitation avec indication des flux de substances.



b) Evaluation graphique de l'équipement du site.



Selon l'historique du site, il peut s'avérer judicieux d'établir des plans distincts et une synthèse pour chaque phase de production.

6 Cahier des charges de l'investigation technique

6.1 Remarques générales

L'élaboration du cahier des charges est basée sur l'aide à l'exécution de l'OFEV « Cahier des charges pour l'investigation technique des sites pollués » [3]. Ce document décrit bien la démarche générale à suivre, mais l'étude des pollutions par des HCC est particulièrement exigeante. Certaines étapes doivent donc être décrites plus en détail, en tenant dûment compte des stratégies d'investigation envisageables. Rappelons que l'expert doit disposer de vastes connaissances et d'une grande expérience pour accomplir la tâche très importante de l'élaboration du cahier des charges. La pratique indique que, lorsque des investigations fournissent des résultats erronés, les erreurs cruciales se produisent souvent à ce stade, par manque de connaissances ou pour des raisons de coût (pression due à la concurrence).

Art. 7, al. 4, OSites:
« L'investigation technique sert à identifier le type et la quantité de substances présentes sur le site, leur possibilité de dissémination ainsi que l'importance des domaines de l'environnement concernés. »

L'ampleur de l'investigation technique à effectuer dans le cadre de l'étude préalable d'un site potentiellement contaminé n'est pas définie exactement et elle fait souvent l'objet d'interprétations divergentes. La formulation de l'art. 7, al. 4, OSites va relativement loin. Dans les cas impliquant des HCC, il est effectivement très important de connaître le type et la quantité de substances présentes sur le site. Les points de mesure des eaux souterraines situés « en aval à proximité du site », qui déterminent le classement de ce site, ne peuvent être positionnés correctement que si le périmètre du site est connu, du moins dans les grandes lignes. Cette exigence est surtout motivée par le fait que les caractéristiques des HCC leur permettent de se répandre dans le sous-sol en empruntant des cheminements très étroits et complexes. En général, la configuration de leur dissémination est nettement plus complexe que pour les autres polluants. Lorsqu'on ignore l'emplacement du ou des foyers de pollution, il faudrait placer un réseau serré de points de mesure, ce qui est rarement économique. De plus, on doit connaître la répartition des polluants sur le site même pour pouvoir évaluer les possibilités de dissémination comme demandé dans l'OSites.

La différence avec l'investigation de détail faisant l'objet de l'art. 14 OSites réside principalement dans le niveau de précision de l'étude. Dans les cas impliquant des HCC, l'investigation de détail représente souvent une nouvelle étape de la démarche itérative, qui a pour but de combler les lacunes entachant les connaissances et de vérifier les hypothèses à la base du modèle retenu.

6.2 Stratégie d'investigation

Avant de concevoir l'investigation technique d'un site potentiellement contaminé, il faut répondre à ces questions:

1. Doit-on analyser la matière solide et/ou l'air interstitiel et/ou l'eau souterraine?
2. Comment poser des points de mesure représentatifs?
3. Quelle technique d'échantillonnage est adaptée?
4. Quel programme d'analyse est nécessaire?

Si les réponses à ces questions sont incorrectes ou inadaptées aux conditions locales, le résultat des échantillonnages peut être erroné de plusieurs ordres de grandeur.

Différentes méthodes, qui présentent toutes des avantages et des inconvénients, sont utilisables pour procéder aux investigations. Le tableau 3 synthétise les applications possibles des méthodes d'investigation les plus courantes.

Tableau 3:
Applications possibles de certaines méthodes d'investigation aux cas impliquant des HCC.

Type d'investigation	Délimitation de la source de pollution	Appréciation du site selon l'OSites	Quantification des coûts prévisibles ¹⁾
Investigation historique	Obligatoire	Obligatoire	Obligatoire
Analyse de l'air interstitiel	++ ²⁾	- ³⁾	+
Prélèvement de matière solide	+ ⁴⁾	-	+ ⁴⁾
Sondage direct-push, diagraphie MIP	++ ⁵⁾	-	+
Essai de lixiviation	-	-	---
Analyse des eaux souterraines ⁶⁾	+	+++	-

+++ : nécessaire, sauf cas dûment justifiés

++ : important

+ : applicable dans certaines conditions

- : inapproprié, sauf cas dûment justifiés

--- : inapplicable

¹⁾ En général, la quantification des coûts prévisibles n'est pas exigée par l'autorité; ces données sont destinées le cas échéant au mandant.

²⁾ Convient aux couches perméables aux gaz.

³⁾ Lorsque des valeurs très élevées sont atteintes dans des périmètres bâtis, une analyse de l'air interstitiel, importante pour l'appréciation du site au sens de l'art. 11 OSites, peut être nécessaire. Si l'on ne peut pas prélever d'eau souterraine ou de percolation, il est possible de classer le site en analysant l'air interstitiel selon l'annexe 1, ch. 4, OSites.

⁴⁾ Seulement pour les HCC peu volatils et si le prélèvement est effectué dans les règles de l'art. Ne donne souvent que des indications, surtout pour les sédiments grossiers.

⁵⁾ Applicable aux couches meubles.

⁶⁾ Si des eaux superficielles sont directement touchées (cas exceptionnel), il peut être nécessaire d'analyser aussi les eaux de drainage et de surface.

Les principes suivants, applicables aux investigations préalables relatives aux HCC, découlent du tableau 3:

A retenir:

- ▶ Toute investigation technique pertinente est précédée d'une investigation historique solide.
- ▶ Lorsqu'elles sont exécutées correctement, l'analyse d'air interstitiel, l'analyse de matière solide et la diagraphie MIP sont de bonnes méthodes de délimitation (indicatives) du site et des foyers de pollution.
- ▶ Un classement fiable des sites selon l'ordonnance sur les sites contaminés est seulement possible sur la base d'un échantillonnage des eaux souterraines.

La démarche suivante convient habituellement à l'investigation technique:

1. Elaboration d'un modèle conceptuel (matrice d'investigation).
2. Délimitation des zones d'entrées de pollution.
3. Etude des émissions de polluants.

Les pollutions par des HCC nécessitent souvent plusieurs étapes d'investigation. Dans une démarche itérative, le modèle conceptuel doit être examiné et adapté à la lumière des derniers résultats obtenus, puis vérifié par des études complémentaires (p. ex. en affinant l'investigation historique ou en analysant à nouveau l'air interstitiel).

Cf. § 7, page 40ff

En plus de cette démarche générale, de nombreuses stratégies d'échantillonnage s'appliquent spécifiquement à certains types d'investigations. Elles seront discutées au chapitre 7.

6.3 Elaboration du cahier des charges et bases nécessaires

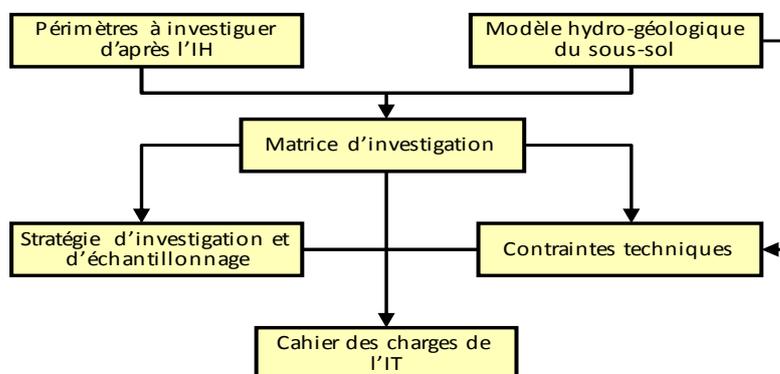
Les éléments suivants sont nécessaires pour élaborer le cahier des charges de l'investigation technique (tab. 4):

Tableau 4:
Bases nécessaires pour élaborer le cahier des charges.

Instrument	Informations essentielles
Plan des périmètres à étudier selon l'investigation historique (cf. § 5.3.1, page 31)	<ul style="list-style-type: none"> • Emplacement des foyers de pollution présumés • Types d'émissions présumés (phase liquide, dissoute, gazeuse) • Spectre de polluants présumé • Quantités de polluants (ordre de grandeur) • Taux d'infiltration (indication qualitative)
Modèle géologique du sous-sol (cf. § 4.5, page 23)	<ul style="list-style-type: none"> • Capacité de rétention (indication qualitative) • Voies de disséminations présumées • Milieux probablement touchés (matière solide, air interstitiel, eaux souterraines, etc.) • Contraintes techniques posées aux méthodes d'investigation

La première étape consiste à établir la matrice d'investigation à partir de ces informations (fig. 9). Elle inclut la dissémination présumée des polluants dans le sous-sol (milieux à protéger touchés), contrairement au plan des périmètres à étudier. Il est recommandé de reporter sur le plan les zones vraisemblablement situées en aval du site, conformément à l'aide à l'exécution [4].

Fig. 9:
Procédure générale d'élaboration du cahier des charges.



La deuxième étape consiste à élaborer le cahier des charges proprement dit ainsi que le programme des investigations, en suivant une stratégie tenant compte des contraintes techniques (limitations des méthodes appliquées).

6.4 Contenu du cahier des charges

Le cahier des charges de l'investigation technique doit être élaboré conformément à l'aide à l'exécution pertinente de l'OFEV [3]. Il comprendra les éléments suivants:

1. Contexte initial

- ▶ motif et cadre temporel des investigations
- ▶ description du site (p. ex. foyer de pollution)
- ▶ milieux à protéger menacés
- ▶ hypothèse concernant la pollution
- ▶ nappe souterraine en aval à proximité du site

Cf. aide à l'exécution
[4]

2. Buts de l'investigation technique

3. Programme d'investigation (tableau selon [3])

Les points suivants doivent être définis en fonction des données disponibles et présentés dans un tableau:

- ▶ Programme de sondage emplacement et profondeur des sondages, procédé appliqué, équipement des points de mesure si cela est possible sur la base des informations disponibles (type et diamètre des tuyaux crépinés, tronçons aveugles et perforés, obturateurs, etc.)
- ▶ Programme d'échantillonnage pour chaque sondage: méthode appliquée, profondeur probable du prélèvement, quantité prélevée, récipients utilisés, mode de stockage et de transport (p. ex. réfrigération), directives concernant le délai de livraison
- ▶ Programme d'analyse directives concernant le délai de traitement dès la réception des échantillons, paramètres à analyser, seuils de quantification

Cf. exemple du
tableau 5 page 38

4. Possibilités de fractionnement

Les différents volets du programme d'investigation doivent être énumérés avec un maximum de détails. Si les conclusions définitives dépendent des résultats des sondages (démarche itérative) ou si des données essentielles font défaut (p. ex. régime des eaux souterraines, constitution du sous-sol), la procédure et les critères de décision à mettre en œuvre seront décrits clairement. C'est notamment le cas lorsqu'il s'agit de déterminer la profondeur des sondages et l'équipement des points de mesure des eaux souterraines. On exposera les principes à suivre pour limiter au maximum le risque de court-circuit hydraulique.

Cf. fig. 8 page 33

Le programme de sondage doit être illustré dans un « plan des sondages », qu'on tâchera de combiner avec le plan des surfaces d'investigation.

Cf. § 7, page 40ff Le procédé de sondage prévu sera désigné ou décrit précisément. Par exemple, la qualité des renseignements obtenus et les possibilités d'aménager un point de mesure des eaux souterraines ne sont pas les mêmes avec un forage par carottier rotatif ou battu. Le choix du procédé de sondage doit tenir compte de l'accessibilité du site ainsi que des avantages et des inconvénients des différentes méthodes, exposés au chapitre 7.

Pour établir le programme d'analyse, on part du principe que le premier échantillonnage n'est pas axé spécifiquement sur le polluant présumé. L'analyse par « screening » ou par « fingerprint » ainsi que l'analyse de paramètres cumulatifs permettent de confirmer ou d'exclure la présence d'éventuelles autres pollutions importantes, pour un coût modeste.

Tableau 5:

Exemple de programme d'investigation (modifié d'après [3]).

Programme d'investigation										
Programme de sondage		Programme d'échantillonnage				Programme d'analyse				But
Secteur	Lieu de sondage	Méthode de sondage	Type d'échantillon	Méthode, nombre d'échantillons, quantité	Prélèvement des échantillons	Paramètres à analyser	Seuil de quantification	Précision de la mesure ¹⁾	Méthode	
Exemple:										
A	A1	Forage carotté jusqu'à l'aquitard, avec piézomètre de 4,5"	Eaux souterraines	Pompe immergée à 4 m de profondeur, 2 éch. de 1 l ²⁾	Renouveler 1x le contenu du tubage, T et cond. élect. constantes ³⁾	Purge & Trap: 61 composés volatils	0,05 µg/l ⁵⁾	±25%	GC/MS après Purge & Trap ⁵⁾	Echantillon d'eau représentatif pour évaluer le site
			Matière solide	3 éch. de 5 kg transport réfrigéré, emballage étanche à l'air	1 éch. de matière solide forée par couche	TRI PER	0,5 µg/kg 0,5 µg/kg 0,5 µg/kg ³⁾	±40% ±40% ±40%	SPME GC/MS ⁶⁾	Indicatif, pour déterminer la profondeur de la pollution
		5 sondages, sonde creuse, profondeur ~1 m	Air interstitiel	5 éch. de 10 l d'air sur des tubes de charbon actif ⁴⁾	Aspirer 3x le volume mort de la sonde, puis aspirer à 0,5 l/min ⁴⁾	TRI PER CV	0,1 mg/m ³ 0,1 mg/m ³ 0,1 mg/m ³ ⁷⁾	±40% ±40% ±40%	Adsorption sur des tubes de charbon actif ⁷⁾	Indicatif, pour déterminer la position horizontale de la pollution
	A2	Forage carotté jusqu'à l'aquitard, avec piézomètre de 4,5"	Eaux souterraines	Pompe immergée à 4 m de profondeur, 2 éch. de 1 l ²⁾	Renouveler 1x le contenu de tubage, T et cond. élect. constantes ³⁾	Purge & Trap: 61 composés volatils	0,05 µg/l ⁵⁾	±25%	GC/MS après Purge & Trap ⁵⁾	Echantillon d'eau représentatif pour évaluer le site
			Eaux souterraines	Pompe immergée, 10 éch. de 1 l ²⁾	1 éch. par m de forage	Purge & Trap: 61 composés volatils	0,05 µg/l ⁵⁾	±25%	GC/MS après Purge & Trap ⁵⁾	Indicatif, pour déterminer la profondeur de la pollution
	B	...								
...	...									
Reste du périmètre	...	Echantillons solides: 3 fouilles à la pelle mécanique, prof. ~2 m	...	...	...	...	...	...	...	Indicatif

- ¹⁾ Incertitude de mesure combinée élargie. ⁴⁾ Directives selon [2].
²⁾ Volume des échantillons d'eau: selon directives du laboratoire. ⁵⁾ Directives selon [1]: méthode E-8 pour les échantillons d'eau.
³⁾ Directives selon [4]: renouveler au moins une fois le contenu du tube, échantillonnage à température et conductivité électrique constantes. ⁶⁾ Directives selon [1]: méthode S-8 pour les échantillons solides.
⁷⁾ Directives selon [1]: méthode S-20 pour les tubes d'adsorption.

Cf. § 7.6.5, page 56 En fonction de la problématique, il est recommandé de vérifier la qualité du point de mesure ou du modèle hydrologique utilisé en analysant quelques paramètres généraux de l'eau. Ils permettent notamment d'identifier clairement des infiltrations d'eaux superficielles ou des fuites dans des canalisations. Ces paramètres généraux fournissent aussi des informations sur le milieu aquifère et sur les conditions redox, ce qui aide à interpréter le spectre de polluants trouvé.

6.5 Approbation du cahier des charges

Le cahier des charges doit être examiné par l'autorité compétente en vertu de l'art. 7, al. 3, OSites. Ce contrôle est notamment indispensable si des coûts doivent être imputés à des tiers (procédure de répartition des coûts ou indemnisation en vertu de l'OTAS).

7 Investigation technique

7.1 Conception de l'échantillonnage

L'investigation technique est réalisée conformément au cahier des charges approuvé (section 6.5). Les considérations générales au sujet de la stratégie d'investigation ont été exposées à la section 6.2. Les aspects techniques des méthodes les plus utilisées sont discutés ci-après.

La figure 10 illustre schématiquement les domaines d'application des méthodes d'investigation les plus utilisées (air interstitiel, matière solide et eaux souterraines). Elle montre qu'une méthode est plus ou moins appropriée selon l'emplacement de la source de HCC et la configuration hydrogéologique. Il faut donc accorder une grande importance à la vérification du modèle hydrogéologique et à la détection / délimitation du foyer de pollution. Le programme des investigations futures doit souvent être revu et adapté sur cette base.

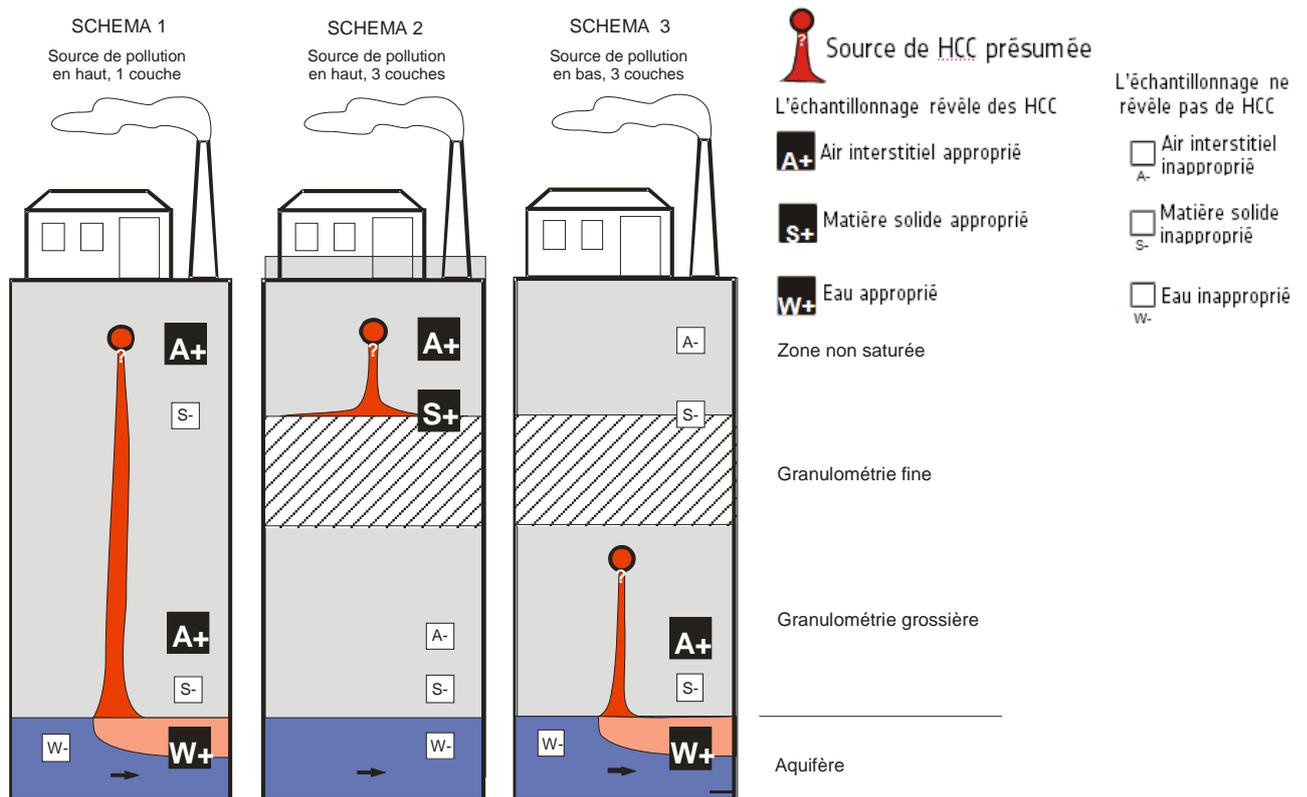


Fig. 10: Stratégie de reconnaissance en fonction de la constitution du sous-sol et des conditions hydrogéologiques (schéma de principe simplifié, pas à l'échelle).

7.2 Analyse de l'air interstitiel

7.2.1 Conception et conditions d'application

L'analyse de l'air interstitiel est l'un des procédés les plus connus pour délimiter les pollutions par des HCC dans le sous-sol. Les bases de l'application de cette technique sont décrites dans l'aide à l'exécution « Prélèvement d'échantillons et analyse d'air interstitiel » [2].

L'étude de l'air interstitiel permet de cerner la pollution et d'obtenir des indications sur les HCC si quelques conditions fondamentales sont satisfaites:

- ▶ prélèvement adéquat: des tronçons aveugles ou des obturateurs sont posés pour garantir que l'on n'aspirera pas d'air atmosphérique (« étranger »). Ceci peut se faire en mesurant le CO₂ ou le radon (teneur souvent élevée dans l'air interstitiel) ou la pression;
- ▶ analyse adéquate: dans la première phase de l'investigation technique, qui aiguille la suite des travaux, l'air interstitiel devrait toujours être analysé par chromatographie en phase gazeuse (GC), car il faut d'abord déterminer le spectre de polluants et leur répartition;
- ▶ informations sur le sous-sol: pour pouvoir concevoir et interpréter une étude de l'air interstitiel, il faut toujours disposer d'une description du sous-sol, éventuellement basée sur des forages de reconnaissance, des puits de sondage ou des forages par carottier battu. Les mesures de l'air interstitiel doivent toujours être adaptées aux conditions locales (fig. 10);
- ▶ mesures cumulatives de l'air interstitiel: lorsque la concentration de HCC est élevée, les méthodes de mesure cumulatives ou semi-quantitatives (tubes à indication directe, appareils totalisateurs à PID, etc.) peuvent faciliter la délimitation du foyer de pollution. Mais les résultats obtenus devraient toujours être confirmés par des analyses en laboratoire réalisées parallèlement;
- ▶ il peut être judicieux de prélever de l'air interstitiel à différentes profondeurs;
- ▶ la stratégie de sondage doit être adaptée aux conditions locales (quadrillage, profils croisés avec retour en arrière pour resserrer les mesures). La pollution est bien plus vite délimitée lorsqu'on fait des analyses sur place au moyen d'un laboratoire mobile;
- ▶ la maille du quadrillage a généralement une largeur de trois à cinq mètres dans le secteur présumé du foyer de pollution. Il est resserré en cas de résultat positif. On compte habituellement cinq à quinze points de mesure par foyer de pollution;
- ▶ un sondage par carottier battu peut être utilisé pour mesurer l'air interstitiel. On transforme par exemple un forage en point de mesure temporaire ou permanent en l'équipant de filtres et d'obturateurs adéquats. L'interprétation des résultats doit tenir compte du fait que le mode d'échantillonnage et le volume prélevé influencent la concentration mesurée dans l'air interstitiel.

7.2.2 Echantillonnage étagé de l'air interstitiel

Cf. fig. 10
page 40

L'échantillonnage étagé de l'air interstitiel est recommandé lorsqu'on est en présence de couches diversement perméables ou de couches intercalaires imperméables. Cette technique fournit aussi des informations importantes sur la répartition verticale de la pollution dans le cas d'un sous-sol homogène et d'une pollution inhomogène. Les techniques suivantes sont applicables:

- ▶ échantillonnage de l'air interstitiel dans le tronçon non tubé pendant l'avancement d'un forage carotté. Notons que le tronçon non tubé doit être rendu étanche à tout afflux d'air ambiant. Si les résultats ne sont pas reproductibles, ils donnent néanmoins des indications sur l'aménagement final du point de mesure;
- ▶ échantillonnage de l'air interstitiel dans un point de mesure permanent à niveaux multiples. En l'équipant, on placera les étanchéités nécessaires pour éviter tout contact entre les différents niveaux mesurés, comme dans le cas des eaux souterraines. Cette configuration indique la position momentanée de la pollution et révèle certaines évolutions temporelles, telles que poursuite de l'infiltration d'une phase de HCC ou écoulement d'une phase de HCC en profondeur.

7.2.3 Restrictions d'utilisation

Les analyses de l'air interstitiel sont peu ou pas appropriées dans les cas suivants:

- ▶ les méthodes impliquant de très petits échantillons sont très sensibles au remaniement du terrain;
- ▶ les méthodes d'investigation dont la première étape ne comprend aucune analyse par chromatographie en phase gazeuse, mais seulement des procédés cumulatifs ou indirects (tubes à mesure immédiate, appareils totalisateurs à PID, mesure du CO₂, etc.), sont inappropriées; (voir aussi AE Air interstitiel [2]) les mesures au moyen de collecteurs passifs (substances adsorbantes laissées dans le sous-sol) se sont souvent avérées inadaptées à l'investigation de sites industriels; elles ont rarement fourni une corrélation entre les valeurs relatives mesurées et les centres de pollution importants pour les eaux souterraines;
- ▶ dans un sous-sol cohésif, il arrive que l'échantillonnage soit impossible, car on ne peut pas extraire d'air interstitiel;
- ▶ les résultats des analyses d'air interstitiel peuvent être faussés considérablement si le sous-sol contient beaucoup de matière organique.
- ▶ Les différents échantillonnages ne peuvent pas être comparés entre eux en raison de nombreux facteurs d'influence indétectables comme par ex. une distribution hétérogène de la perméabilité à petite échelle, ou une influence perturbatrice de la matière organique, des fondations très perméables ou des tranchées de conduites. Il n'est donc pas possible d'évaluer le site conformément à l'ordonnance sur les sites contaminés sur la base de la concentration de l'air interstitiel.

A retenir:

- ▶ Seuls les échantillons d'air interstitiel qui ont été prélevés et mesurés selon la même méthode peuvent être comparés directement.
- ▶ Lorsque la constitution du sous-sol est inconnue et que la technique d'échantillonnage n'est pas décrite, les résultats des mesures de l'air interstitiel ne peuvent pas être interprétés.

7.2.4 Précisions concernant les techniques et leur mise en œuvre

L'aide de travail [2] et les documents cités dans l'annexe bibliographique fournissent des explications sur les différentes méthodes de mesure de l'air interstitiel et proposent une bibliographie plus approfondie. Elles sont complétées ici par quelques précisions concernant les techniques mises en œuvre et leur exécution:

- ▶ échantillons d'air interstitiel prélevés sous un radier: les échantillons d'air interstitiel prélevés juste sous un radier perforé ne fournissent généralement que des indications qualitatives sur les pollutions par des HCC, car la provenance exacte du gaz échantillonné n'est pas connue et il faut en général s'attendre à une dilution significative des concentrations en polluants. Le gaz peut souvent migrer dans des cavités et des zones perméables situées directement sous le radier. Ainsi, les échantillons dilués prélevés sous un radier ne sont pas très significatifs. Si un radier doit être perforé, il faut donc prélever les échantillons au travers d'une lance battue dans le sous-sol. Cela permet d'attribuer la pollution mesurée à un endroit précis;
- ▶ problème du chlorure de vinyle (CV): le problème posé par le CV, impliqué dans certaines pollutions aux HCC, est peu traité dans la littérature ancienne. Cette substance extrêmement volatile, considérée comme cancérigène, peut être préjudiciable aux constructions existantes ou prévues au voisinage de pollutions aux HCC. Dans ce cas, le CV provient généralement de la dégradation de HCC ou parfois de la production de PVC. Comme le CV est souvent présent, il faudrait le rechercher systématiquement dans les échantillons d'air interstitiel;
- ▶ échantillonnage de chlorure de vinyle pour analyse: lors du prélèvement, il faut prendre des mesures particulières, d'entente avec le laboratoire d'analyse, car le CV est relativement peu adsorbable et extrêmement volatil;
- ▶ essai d'aspiration: cette technique, généralement appliquée lors d'étapes ultérieures (investigation de détail ou en vue d'un assainissement), qui consiste à mesurer la concentration des polluants en fonction du temps lors d'un essai de pompage, peut être utilisée dans un but exploratoire. L'essai d'aspiration indique si le point de mesure se trouve à proximité d'un foyer de pollution. Il donne aussi des renseignements sur le potentiel de pollution. Mais sa mise en œuvre exige une grande expérience et des techniques de mesure coûteuses;
- ▶ pollution secondaire due au dégazage d'eaux souterraines: les eaux souterraines présentes dans le périmètre d'investigation ou y pénétrant peuvent augmenter notablement la charge de fond de l'air interstitiel (exemple de concentration théorique à l'équilibre: 30 µg de PER par litre d'eau sont en équilibre avec 10 mg de PER

Cf. § 3.6
page 19

par mètre cube d'air interstitiel en contact direct avec l'eau). Il faudrait donc, parallèlement aux mesures de l'air interstitiel, prélever des échantillons d'eau dans les secteurs où la concentration de HCC dans les eaux souterraines peut influencer leur teneur dans l'air interstitiel.

7.3 Analyse du sol et de la matière solide

7.3.1 Conception et conditions d'application

Cf. § 3.8 page 19 Les échantillons de matière solide ne conviennent qu'à certaines conditions pour quantifier les HCC volatils.

Ceci concerne notamment les HCC très volatiles comme par ex. le trichloroéthène (pression de vapeur env. 3 fois supérieure à celle de l'eau), le cis 1,2-DCE (pression de vapeur env. 9 fois supérieure à celle de l'eau) ou le chlorure de vinyle (pression de vapeur env. 126 fois supérieure à celle de l'eau). Par contre, le tétrachloroéthène, de loin la plus fréquente, est environ 40% moins volatile que l'eau et donc moins problématique du point de vue de l'évaporation.

Les différentes manières de procéder, ainsi que leurs avantages et inconvénients, sont décrites dans [5].

En particulier dans le cas des HCC volatils et des graviers grossiers du sous-sol (c'est pour ce type de sous-sol que l'inévitable remaniement de la structure est le plus important lors de l'échantillonnage), les analyses de HCC ne fournissent que des valeurs minimales, parce qu'une partie d'entre eux se volatilise pendant l'échantillonnage, voire au laboratoire.

Cf. [Guide des HCC](#)[5] [5], cf. § 3.1 Comme les échantillons ne doivent pas être séchés en laboratoire, on utilise toujours l'échantillon humide pour les analyses de matières solides. Le résultat est généralement indiqué sous la forme d'une concentration par kg de substance sèche et est directement comparé avec les valeurs limites de l'ordonnance sur les déchets OLED, bien que la mesure comprenne aussi une certaine part de HCC dissous dans l'eau de rétention. Cela est acceptable car la fraction massique de HCC dissous mesurée dans l'eau de rétention est généralement insignifiante. Pour une proportion d'eau de 15-20% typique des échantillons humides et une composition normale du sous-sol, la fraction massique de HCC dissous dans l'eau de rétention est < 1% conformément à l'équilibre de phase de la plupart des HCC (voir aussi chap. 3.6). Les éventuels HCC en phase (par ex. gouttelettes de phase) doivent être imputés à la matière sèche comme pour la phase huileuse.

Cf. § 3.2 page 12 et fig. 3 page 15 Dans les matériaux fins peu perméables, la phase de HCC est retenue préférentiellement. Un échantillon prélevé dans les règles de l'art au moyen d'un forage carotté dans des matériaux fins (sable fin, limon, argile) est considéré comme représentatif.

Le prélèvement d'échantillons solides et l'interprétation des résultats des analyses doivent tenir compte des caractéristiques physico-chimiques particulières des HCC, qui sont notamment les suivantes:

- ▶ contrairement à de nombreux autres polluants, les HCC présents dans le sous-sol ne sont pas révélés par une coloration du squelette minéral ni par une odeur suspecte;
- Cf. fig. 3 page 15 ▶ la phase de HCC est à même de traverser l'aquifère et son plancher; dans les zones où la capacité d'adsorption est faible, de grandes quantités de HCC peuvent s'infiltrer à travers des surfaces relativement restreintes;
- Cf. fig. 3 page 15 ▶ les HCC sont dissous et transportés par l'eau (sorption dans le sous-sol) ou ils migrent sous forme gazeuse.

L'investigation technique visant essentiellement à évaluer les risques et à déterminer la répartition spatiale des HCC, il est recommandé d'observer les points suivants lorsqu'on prélève des échantillons de matière solide:

- ▶ les prélèvements devraient être effectués à l'emplacement des foyers de pollution présumés;
- ▶ le prélèvement de matière solide devrait toujours tenir compte du profil géologique observé; on échantillonnera de préférence les couches de capacité d'adsorption élevée et les couches de granulométrie fine, qui tendent à retenir les polluants;
- ▶ les échantillons devraient toujours être prélevés dans un seul et même horizon; il est conseillé de décrire précisément le niveau échantillonné et la granulométrie des échantillons;
- ▶ le prélèvement d'échantillons mixtes n'est pas pertinent dans le cadre de l'investigation technique;
- ▶ il est recommandé d'échantillonner plusieurs tronçons de forage, afin d'établir un profil de concentration.

Pour délimiter des secteurs représentatifs avant de prélever de la matière solide, on peut, par exemple, échantillonner l'air interstitiel par zones ou effectuer des analyses « Headspace » d'échantillons solides, selon les conditions locales. Les méthodes de délimitation devraient être systématiquement complétées par un nombre suffisant de forages de reconnaissance, dont le profil géologique sera levé.

7.3.2 Précisions concernant le prélèvement

- Cf. § 3.8 page 19 Le prélèvement d'échantillons solides remanie inévitablement le squelette minéral, ce qui provoque un dégazage ou, le cas échéant, éventuellement une perte par écoulement de HCC présents sous la forme de phase liquide.

A retenir:

Un échantillon de matière solide remaniée ne fournit généralement qu'une valeur minimale des teneurs en HCC.

Dans un sous-sol cohésif de granulométrie majoritairement fine, on peut réaliser un échantillonnage plus ou moins significatif en prenant les mesures suivantes:

- ▶ échantillons « intacts » (voir ci-dessous);

- ▶ emballage immédiat, étanche à l'air (généralement dans des récipients en verre ; remplir les récipients jusqu'à ras bord pour minimiser l'espace d'air ambiant);
- ▶ transport toujours sous réfrigération, à l'abri de la lumière (glacière avec éléments de refroidissement);
- ▶ livraison immédiate au laboratoire (le jour même);
- ▶ stockage des échantillons et homogénéisation par le laboratoire; les tenir le plus au froid possible mais sans congélation, jusqu'à l'analyse, qui aura si possible lieu dans les 24 heures.

Il ne faut donc pas envoyer au laboratoire de la matière solide contenant des HCC par poste ou par avion.

Les échantillons de matière solide pourraient en principe aussi être « fixés », par exemple avec du méthanol, pour limiter les pertes par dégazage. Cette fixation demande toutefois un important effort de coordination avec le laboratoire, nécessite la manipulation problématique du dangereux méthanol et n'est possible que pour de petites quantités d'échantillons (par ex. 20-30 g). Lorsqu'on utilise des solvants, il faut en plus veiller à ce qu'ils ne soient pas contaminés par des substances présentes dans l'air ambiant. En général, les petits échantillons ne remplissent pas les critères de qualité granulométriques relatives à la quantité minimale d'échantillon. Comme les exigences en matière de coordination et d'échantillonnage sont en plus très élevées, il est rare de pouvoir appliquer cette méthode à large échelle dans la pratique. Des mesures comparatives effectuées sporadiquement ont en outre montré que pour le tétrachloréthène, la différence par rapport à un échantillonnage conventionnel (transport sous réfrigération) était plus petite que l'erreur d'analyse attendue.

Pour le prélèvement d'échantillons « intacts », le squelette minéral est beaucoup moins remanié lors des forages par carottier rotatif de grand calibre (p. ex. $\varnothing_{\text{int}} \geq 4\frac{1}{2}$ " et $\varnothing_{\text{ext}} \geq 168$ mm) que lors des sondages par carottier battu de petit calibre ou par direct-push ($\varnothing \leq 2$ ", soit ≤ 50 mm, parfois ≤ 40 mm). En général, un terrain cohésif fin est nettement moins remanié qu'un terrain grossier. Dans le cas des sous-sols très grossiers, (par ex. présence de pierres ou de blocs), l'échauffement inévitable du matériau en raison du processus de forage est désavantageux. Les « carottes intactes » recueillies par exemple avec un tube d'échantillonnage dans un forage carotté (carottier double) fournissent les meilleurs résultats. En cas de sous-sol de granulométrie fine, ceci est aussi valable pour les échantillons liners prélevés avec le procédé direct-push. Pour toutes les méthodes, on ne devrait utiliser que l'intérieur de la carotte pour l'analyse. Lorsqu'on veut prélever un échantillon à faible profondeur, dans un sol majoritairement cohésif, on peut aussi le prendre dans une fouille creusée à la pelle mécanique (en l'extrayant immédiatement avec grand soin des « mottes de pelleuse»). Ce faisant, il faut absolument respecter les règles de la sécurité au travail (ne pas entrer dans le puits de sondage non sécurisé !).

Lors d'échantillonnages dans le fond des fouilles, en particulier en cas de sous-sol grossier et de HCC très volatiles, il faut s'attendre à un fort dégazage qui va en s'accroissant rapidement après la mise à nu du fond. Un échantillonnage à la pelle ne fournit donc que rarement des résultats représentatifs. L'échantillonnage doit donc avoir lieu immédiatement après la mise à nu du fond (prélever à une profondeur d'au moins 0.2 m) ou en effectuant des fentes de sondage à la pelle mécanique à partir du fond de la fouille.

A retenir:

La fiabilité des échantillons de matière solide dépend énormément du type de HCC présent, de la composition et de la compacité du sous-sol, ainsi que de la méthode de sondage resp. d'échantillonnage. Si l'on choisit une méthode de sondage adaptée au type de sous-sol et que l'on tient compte des prescriptions mentionnées lors du prélèvement des échantillons, on obtient généralement des résultats utilisables, en particulier pour le tétrachloréthène.

7.4 Sondage par enfoncement et diagraphie par sonde MIP

7.4.1 Description générale

Le procédé du sondage par enfoncement (direct push, DP) vient de la géotechnique. Il fournit le profil vertical de plusieurs paramètres, jusqu'à une profondeur de 20 m à 30 m en conditions favorables. Dans ce mode de sondage, une tige prolongée par une tête de mesure est enfoncée ou battue par un procédé mécanique dans le sol. La structure géologique est déduite indirectement de la conductivité électrique du terrain et de sa résistance à la pénétration.

Le procédé MIP (Membrane Interface Probe) permet en outre de mesurer des substances ou des groupes de substances volatiles selon un profil vertical. Mais il ne permet pas de prélever des échantillons a posteriori ni de répéter des mesures dans un ancien sondage. Pour cela, il faut en faire un nouveau.

Paramètres

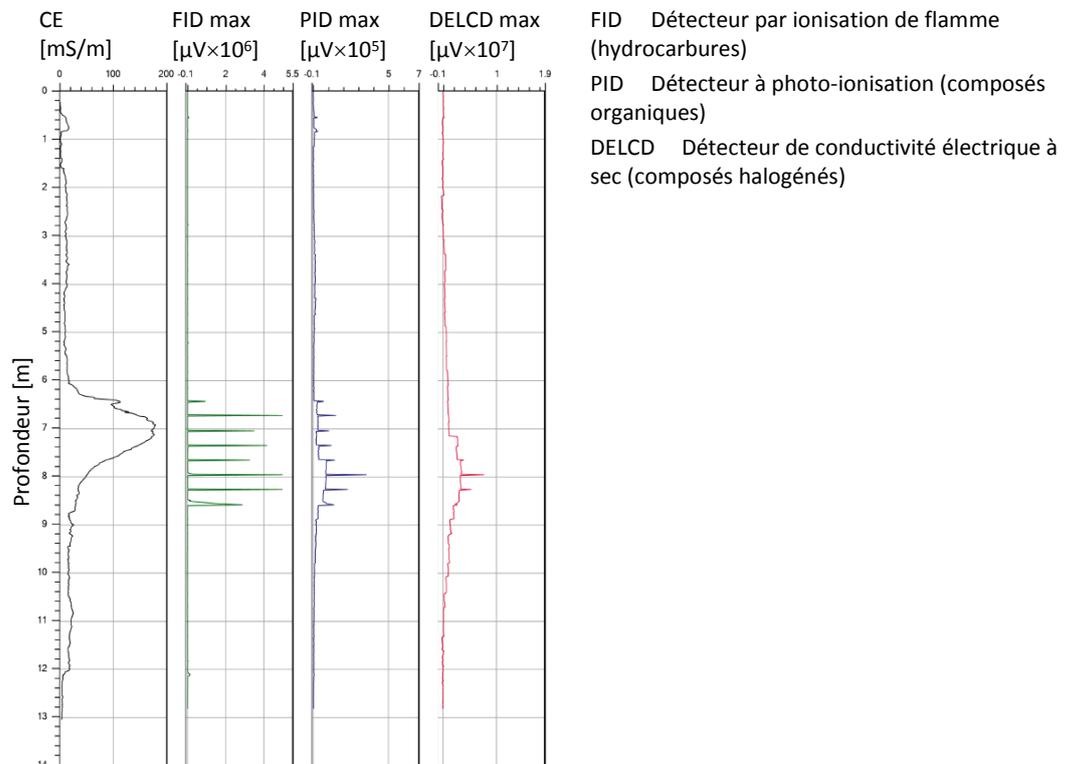
Les paramètres essentiels pour l'investigation des pollutions aux HCC qui peuvent être mesurés lors d'un sondage par enfoncement sont les suivants:

- ▶ diagraphie MIP: détermination qualitative à semi-quantitative de substances volatiles selon un profil vertical continu;
- ▶ mesure de la conductivité: profil vertical de la conductivité électrique, généralement déterminée par la teneur en argile des sédiments, en l'absence de perturbation (due p. ex. à des sels ou à d'autres électrolytes);
- ▶ autres paramètres: la sonde peut être équipée pour mesurer la pression interstitielle, la pression gazeuse, la température ou la compacité in situ lorsqu'il est utile d'en établir le profil vertical pour résoudre certains problèmes;
- ▶ prélèvement: de petits échantillons d'eau ou de matière solide peuvent être prélevés dans un sondage distinct, au moyen d'une tête équipée à cet effet.

Dans une diagraphie MIP, les HCC, volatils, sont évaporés par chauffage à la tête de sondage et transportés par un gaz dans un tube capillaire passant à l'intérieur du train de tiges. L'analyse cumulative des gaz aspirés est effectuée directement dans un véhicule de mesure, par exemple au moyen de divers détecteurs (FID, PID, DELCD). En général, l'analyse des HCC individuels par chromatographie en phase gazeuse n'a pas lieu sur place lorsqu'on procède à une diagraphie MIP.

L'analyse par MIP englobe les HCC sous forme dissoute, de vapeur ou de phase. Les résultats cumulent les teneurs locales de la substance étudiée. Il est donc impossible de distinguer la forme d'occurrence des HCC au point de prélèvement.

Fig. 11:
Exemple de
diagraphie MIP



7.4.2 Avantages du procédé

Le sondage par enfouissement sert notamment à cartographier les structures sédimentaires en trois dimensions et à délimiter qualitativement le foyer de pollution aux HCC. Il permet de définir précisément la stratification et les profils de concentration, en particulier dans les sédiments fins, tels qu'alternances de dépôts lacustres. Réalisé dans les règles de l'art, le sondage par enfouissement fournit une bonne base pour élaborer un concept d'échantillonnage et d'analyse approprié.

7.4.3 Inconvénients et restrictions d'utilisation

Le sondage par enfouissement et la diagraphie MIP ne fournissent des résultats significatifs qu'au voisinage direct de la sonde. Malgré leur définition au centimètre près, ils présentent des incertitudes, notamment dues à l'entraînement de substances qu'ils occasionnent.

Ces procédés sont peu adaptés aux sédiments riches en gravier, pierres ou blocs ou aux sédiments très compacts, car ces derniers ne peuvent pas être traversés par la sonde.

En raison de leur faible volume, les échantillons de sol et d'eau prélevés doivent être considérés comme ponctuels. Ils ne peuvent pas être comparés directement avec les résultats d'échantillons de matière solide prélevés dans les règles de l'art ou d'échantillons d'eau prélevés par pompage préalable.

Il faut tenir compte du fait que le seuil de quantification de ces procédés est assez élevé. Cela est surtout valable pour le tétrachloréthène (PER) qui ne permet pas de détecter de manière fiable les teneurs < 1000 µg/kg dans la matière solide.

Avec les méthodes de sondage par enfoncement et diagraphie par sonde MIP resp. sondage par enfoncement ordinairement utilisées, il n'est pas possible de boucher hermétiquement resp. d'étanchéifier le trou de sondage de manière contrôlée, contrairement aux carottages par rotation. Ceci peut mener à des courts-circuits hydrauliques et à une dissémination non désirée des HCC vers les profondeurs. Il existe toutefois maintenant des procédés spéciaux permettant de boucher hermétiquement le trou de sondage même en utilisant la méthode par enfoncement (« grouting »).

7.4.4 Recommandations concernant l'application de la diagraphie MIP

Comme la diagraphie MIP est une méthode semi-quantitative servant à déceler et à délimiter des foyers de pollution, les résultats qu'elle fournit doivent être confirmés par des méthodes quantitatives.

Dans les régions caractérisées par des structures hydrogéologiques superposées ou des couches imperméables importantes (par ex. fonds de décharge compactés), il faut éviter d'utiliser la diagraphie MIP en profondeur en raison du risque de court-circuit.

7.5 Analyse du lixiviat

Cf. § 3.8
page 19

La lixiviation en colonne selon l'OSites [1] n'est pas pertinente dans le cadre de l'investigation des pollutions aux HCC selon la législation sur les sites contaminés. Lors du remplissage de la colonne, le squelette minéral est inévitablement remanié, ce qui provoque une migration et un fort dégazage des HCC contenus dans l'échantillon.

On peut obtenir des indications qualitatives sur la lixiviabilité des HCC en soumettant un échantillon brut (tel que livré) à un test de lixiviation. Mais les teneurs mesurées restent des valeurs minimales.

A retenir:

Les essais de lixiviation sont superflus dans la plupart des cas, car on doit généralement admettre que les HCC sont aisément lixiviables.

7.6 Analyse des eaux souterraines

7.6.1 Conception et conditions d'application

L'appréciation des pollutions aux HCC se base essentiellement sur l'analyse des eaux souterraines. Les principes de la stratégie d'échantillonnage sont exposés dans les aides à l'exécution de l'OFEFP « Prélèvements d'eau souterraine en relation avec les sites pollués » [4].

7.6.2 Recommandations complémentaires

Conditions générales,
stratégie d'investi-
gation:
cf. § 6.2 page 34

- Pour positionner correctement un point de mesure des eaux souterraines, à proximité immédiate d'un site pollué, il faut connaître l'emplacement, l'extension et la profondeur du site pollué et du foyer, ainsi que la configuration hydrogéologique. Pour la délimitation des sites HCC, on se référera au [document d'aide ChloroNet](#) correspondant. En général, l'appréciation d'un site ne peut pas se fonder uniquement sur un échantillonnage des eaux souterraines dans la zone censée être située en aval d'un foyer de pollution potentiel;
- pour étudier les écoulements souterrains et délimiter les foyers de pollution situés dans les eaux souterraines, on peut commencer par utiliser des piézomètres de petit diamètre ou des piézomètres battus. Puis on posera des points de mesure de grand diamètre sur des emplacements représentatifs en se basant sur la reconnaissance préliminaire;
- l'installation des points d'échantillonnage des eaux souterraines doit tenir compte des particularités hydrogéologiques susceptibles d'influencer notablement les analyses et leur interprétation.

7.6.3 Conception et installation des points de mesure

Précisions supplé-
mentaires
dans [11]

Les techniques applicables pour installer des points de mesure des eaux souterraines et pour les échantillonner sont décrites en détail dans de nombreuses publications. Quelques précisions pratiques, importantes pour l'investigation des pollutions aux HCC, sont résumées et commentées ici.

Nombre et disposition des points de mesure

Il faut au moins trois points de mesure pour déterminer l'écoulement des eaux souterraines sur un site (triangle hydrogéologique). Deux points au moins se trouveront en aval du foyer de pollution et un en amont. Au stade de la reconnaissance, d'anciens points de mesure des eaux souterraines, des puits filtrants ou des piézomètres de petit diamètre font l'affaire. Lorsque le sous-sol est homogène et que les écoulements sont déjà bien connus, on peut déroger à cette règle en motivant clairement cette option.

Le nombre et la disposition des points de mesure implantés juste en aval du site, qui serviront à le classer, dépendent de la taille du site et de la complexité des conditions hydrogéologiques. Ils seront déterminés conformément aux recommandations de l'OFEV [4]. On tiendra compte du fait que le panache de pollution généré par des HCC a souvent quelques mètres de largeur seulement et que le prélèvement de ces substances est plus contraignant que pour d'autres polluants.

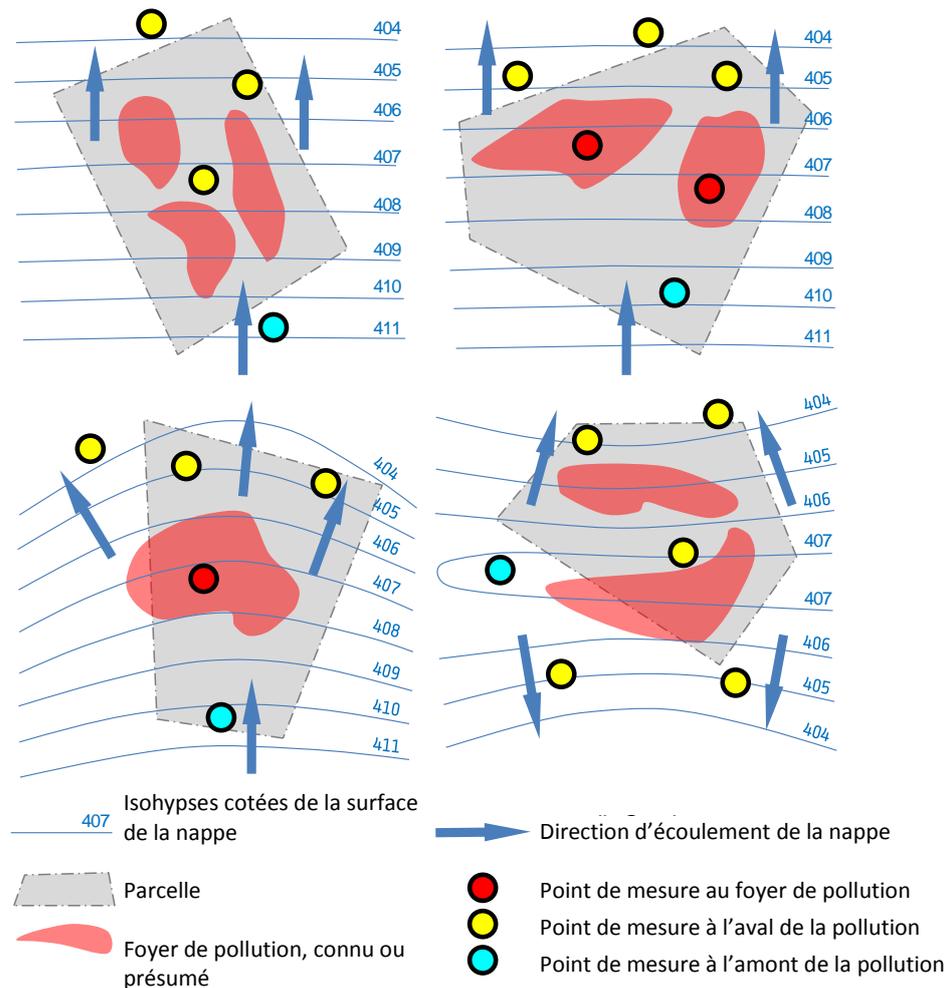
En cas de pollution par des HCC, on place donc généralement deux à trois points de mesure en aval du site afin de le classer. En cas de pollution de fond, il faut y ajouter des points de mesure en amont pour distinguer les différentes pollutions. Leur équipement satisfera bien sûr aux exigences posées aux points de mesure situés en aval du site (voir ci-dessous). La figure 12 indique schématiquement des dispositions possibles de points de mesure des eaux souterraines.

Aménagement et emplacement des points de mesure

Lorsqu'on est en présence d'une pollution par des HCC, l'aménagement des points de mesure des eaux souterraines, très exigeant, requiert une grande expérience. Le matériel extrait de chaque forage doit être relevé régulièrement par un géologue et comparé avec le modèle hydrogéologique pour vérifier la pertinence de celui-ci. Pour vérifier la délimitation du site ou comme preuve que le point de mesure se trouve effectivement à l'extérieur du site, il faut prélever correctement des échantillons de matière solide dans la zone saturée lors de la mise en place des points de mesure et les analyser quant à leur teneur en HCC. Cela permet de mettre en évidence la présence d'éventuelles pollutions qui se seraient propagées avec l'eau souterraine (chapitre 3.5).

Lorsque les observations ne coïncident pas avec le modèle, la poursuite du forage et son aménagement doivent être adaptés aux conditions effectives. Le cas échéant, il faut en discuter avec l'autorité compétente. La profondeur définitive du forage et son aménagement tiendront compte du modèle hydrogéologique révisé.

Fig. 12:
Nombre et
disposition de
points de mesure
des eaux sou-
terraines
(schémas pour
différentes
situations à
l'exemple
de [9]).



L'aménagement des points de mesure doit être adapté à la situation hydrogéologique et à la perméabilité hydraulique des différentes couches. Les points de mesure mis en œuvre pour classer un site devraient avoir un diamètre intérieur de 4,5" au moins, ce qui laisse suffisamment de place pour l'échantillonnage et permet de réduire au maximum le rabattement de la nappe durant l'opération (danger de dégazage lorsque le gravier filtrant est à nouveau immergé). Dans certains cas fondés (p. ex. sédiments lacustres ou dépôts d'atterrissement fins), il est possible de faire des forages de petit diamètre (p. ex. batterie de points de mesure rapprochés). Ces cas requièrent l'accord préalable de l'autorité compétente.

Lorsqu'on s'attend à trouver des concentrations élevées de HCC, il est recommandé d'utiliser des piézomètres en polyéthylène (PE) ou en acier inoxydable, qui résistent mieux aux HCC et les adsorbent moins. En cas de pollution par des HCC, ces points de mesure ne devraient pas être équipés de dépotoir, car une phase de HCC faussant les analyses risque de s'y déposer.

Les dispositifs de mesure des eaux souterraines doivent être crépinés de manière à ce que:

- ▶ chacun d'entre eux soit en contact avec une seule couche aquifère (pas de court-circuit hydraulique);
- ▶ ils soient, si possible, en contact avec toute l'épaisseur des aquifères minces (puits complets, pour éviter de manquer une accumulation de polluants – tels que HCC, phénols ou HAP – à la base du niveau observé);
- ▶ les différentes profondeurs puissent être captées séparément dans le cas des aquifères épais (l'échantillonnage visera prioritairement les 5 m supérieurs pour les aquifères bien perméables). Dans le cas des aquifères épais de 10 m, 20 m ou plus, un crépinage continu mène inévitablement à un mélange vertical ou à des dilutions dans le trou de forage, car en Suisse de tels aquifères présentent très souvent différentes zones d'écoulement et de pollution superposées (voir aussi longueur maximale recommandée du filtre, page suivante).
- ▶ ils soient en contact avec toute la zone de battement de la nappe (plus une tranche d'un mètre au-dessus du niveau maximum admis, pour tenir compte des polluants flottant à la surface de l'eau, liés par oxydation ou adsorbés).

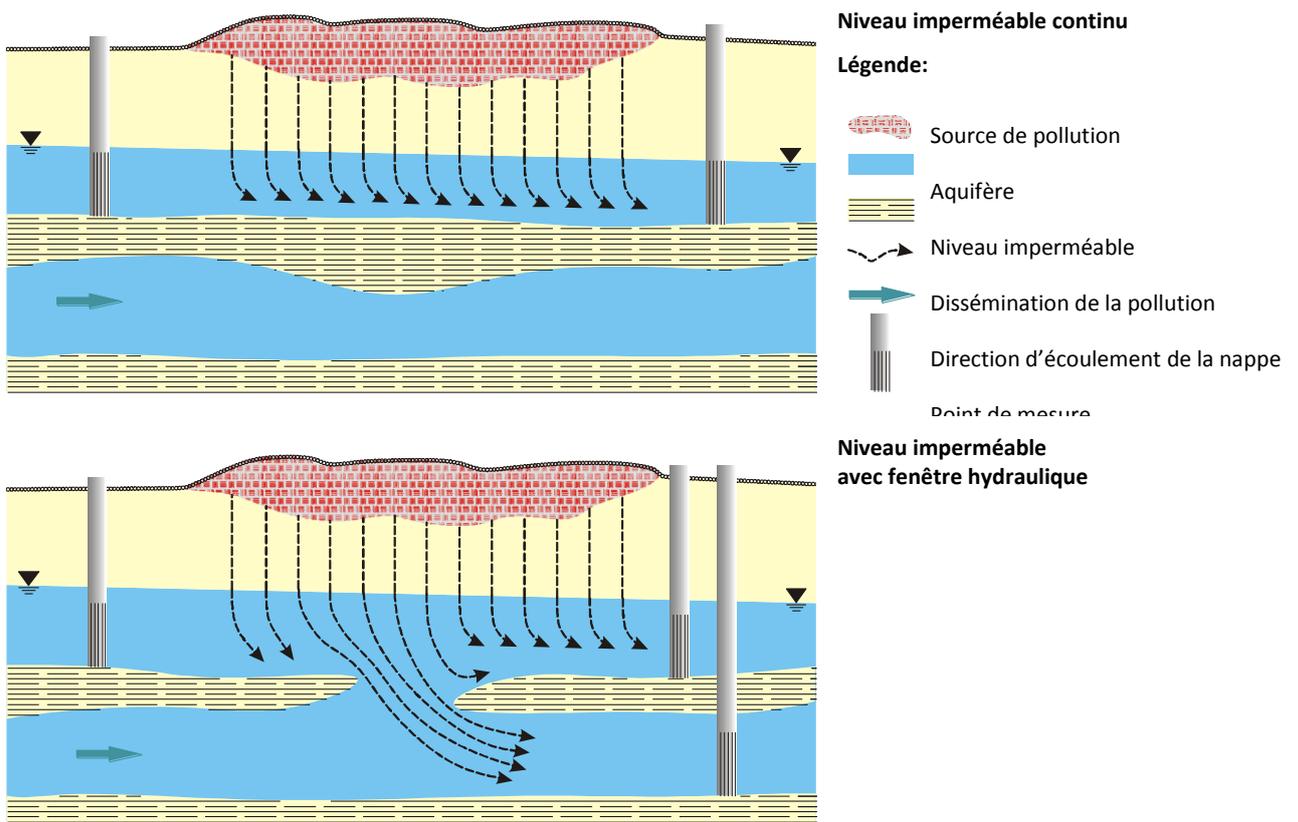


Fig. 13:

Emplacement de points de mesures des eaux souterraines dans le cas d'aquifères superposés en terrain meuble (schémas pour différentes situations à l'exemple de [9]).

Dans une nappe captive, la longueur du tronçon crépiné ne doit pas excéder l'épaisseur de l'aquifère. Dans un aquifère très épais sans cloisonnement marqué, le prélèvement d'échantillons d'eau à différentes profondeurs pendant le forage fournit éventuellement des informations sur la répartition verticale des polluants.

Lorsqu'on ne connaît ni la répartition verticale des polluants dans l'aquifère ni l'éventuel zonage vertical de la nappe, le tronçon crépiné ne devrait pas avoir une longueur supérieure à cinq mètres dans la zone saturée.

Cf. § 7.6.4
page 55

Il est très difficile de discerner si on est confronté à un DNAPL, et s'il faut donc forer jusqu'au plancher imperméable. Un échantillonnage échelonné de l'eau réalisé pendant l'avancement du forage (chapitre 7.6.4) selon la profondeur apportera éventuellement des informations utiles. Les mesures au débitmètre sont aussi très profitables. L'investigation historique (quantité présumée et taux d'infiltration des HCC), les concentrations mesurées au foyer de pollution (air interstitiel, matière solide) et la vitesse d'écoulement de l'aquifère fournissent également des renseignements utiles. Lorsque la vitesse d'infiltration est faible et la vitesse d'écoulement élevée, des HCC sont évacués continuellement sous forme dissoute, si bien qu'ils ne peuvent pas atteindre le plancher imperméable. Quand, lors de la conception et de l'installation des points de mesure, on ne parvient pas à déterminer où placer les tronçons crépinés, on peut prévoir des puits à niveaux multiples ou des grappes de forages pour être sûr de toucher les HCC éventuellement présents.

L'installation de chaque point de mesure des eaux souterraines doit inclure un dessablage réalisé dans les règles de l'art et un essai de pompage de courte durée. Ce dernier donne des indications sur la pertinence du modèle hydrogéologique et fournit une base essentielle pour toute estimation de la pollution. Les échantillons prélevés lors du dessablage et juste après celui-ci ne sont en revanche pas représentatifs des eaux souterraines.

Eviter les courts-circuits

Chaque forage réalisé dans un aquifère perturbe celui-ci au risque de modifier les écoulements s'il n'est pas réalisé correctement. Cela s'applique surtout aux nappes superposées, mais aussi aux nappes « homogènes ». Ainsi, par exemple, la perméabilité hydraulique des aquifères suisses en terrain meuble est souvent beaucoup plus grande horizontalement que verticalement, ce qui génère un étagement des eaux souterraines.

Lorsqu'on fore dans une pollution aux HCC, les stratégies suivantes préviennent au mieux l'établissement d'un court-circuit hydraulique (voir également les explications précédentes):

- la conception et le suivi des forages sont assurés par un conseiller expérimenté en matière de sites contaminés, qui dispose de connaissances approfondies en hydrogéologie;

- ▶ les travaux sont exécutés par une entreprise de forage qualifiée et par un maître foreur expérimenté;
- ▶ les relevés géologiques des matériaux extraits des forages et les échantillonnages étagés sont interprétés avant de décider de l'équipement des forages;
- ▶ l'étanchéité des forages est assurée par une suspension de bentonite ou de bentonite-ciment, ou par une injection de ciment en lieu et place de boulettes d'argile (opalite, Compactonit®);
- ▶ les forages de petit diamètre ne sont pas équipés de points de mesure à niveaux multiples, car il est presque impossible d'en assurer l'étanchéité complète (mieux: grappe de forages). Une entreprise qualifiée peut en installer dans des forages de grand diamètre. Mais il est généralement plus difficile de retirer des échantillons d'eau représentatifs lorsque le diamètre des points de mesure est inférieur à 4,5" (voir ci-dessus).

7.6.4 Echantillonnage étagé des eaux souterraines

Seul un échantillonnage étagé est à même de fournir des renseignements fiables sur la répartition verticale des polluants dans le sous-sol. Deux méthodes sont applicables à cet effet:

- ▶ échantillonnage étagé pendant l'avancement du forage;
- ▶ équipement des points de mesure permettant de prélever à tout moment des échantillons à diverses profondeurs ou dans différents horizons du sous-sol.

Notons que les prélèvements étagés pratiqués pendant l'avancement du forage fournissent seulement des renseignements indicatifs, qu'on peut toutefois exploiter pour déterminer l'aménagement d'un point de mesure (profondeur du forage, emplacement des tronçons crépinés).

La situation hydrogéologique peut exiger le prélèvement d'eau souterraine dans différents horizons. Mais les échantillonnages étagés aident aussi à situer la pollution dans un aquifère de grande épaisseur sans cloisonnement marqué. Les techniques suivantes sont applicables par analogie avec le prélèvement d'air interstitiel:

- ▶ échantillonnage étagé des eaux souterraines et analyse (sur place ou en laboratoire) pendant le forage. Cette méthode permet éventuellement de fixer la position optimale des tronçons crépinés dans des zones de pollution variable. Notons qu'il est pratiquement impossible de prélever un échantillon représentatif, car le forage remanie le sous-sol et fait migrer les HCC éventuellement présents sous la forme de phase;
- ▶ aménagement de puits à niveaux multiples ou réalisation d'une grappe de forages. De tels points de mesure permettent de prélever des échantillons représentatifs et fiables. Ils fournissent des informations sur la profondeur momentanée de la pollution et sur son évolution temporelle.

En présence d'aquifères superposés, le forage et l'aménagement d'un point de mesure risquent toujours de provoquer un court-circuit hydraulique. Les forages en grappes – points de mesure distincts très rapprochés – peuvent être étanchéifiés de

Cf. fig. 13 page 53

Cf. § 7.2.2 page 42

Grappe de forages = point de mesure multiple: plusieurs forages proches, de profondeur et d'aménagement différents.

Cf. § 7.6.3 page 50

manière plus fiable (pas de court-circuit) que les piézomètres à niveaux multiples, introduits en faisceaux dans un seul et même trou de forage.

7.6.5 Echantillonnage des eaux souterraines

L'échantillonnage proprement dit (profondeur de la pompe, débits pompés, pompage préalable, etc.) suit, sauf cas particulier, la recommandation [4] de l'OFEV. On documentera précisément les prélèvements d'eau souterraine pour en assurer la qualité et la reproductibilité. L'annexe 8 comprend un exemple de protocole de prélèvement.

Paramètres de terrain:

Les paramètres de terrain pH, conductivité électrique, température, teneur en oxygène et éventuellement potentiel redox sont mesurés sur place. Lorsque les eaux sont pauvres en oxygène, les mesures in situ de l'O₂ et de l'Eh fournissent des résultats imprécis (O₂: titrage selon Winkler, Eh: calcul). La température et la conductivité électrique sont relevées pendant le pompage préalable, jusqu'à ce que les valeurs soient constantes [4]. Des variations importantes signalent soit une qualité insuffisante des points de mesure (p. ex. intrusion d'eau superficielle), soit un mélange dans le trou de forage (p. ex. tronçons crépinés trop longs) ou dans la zone d'appel du point de mesure.

Remplissage des récipients:

- ▶ tous les échantillons destinés à l'analyse des HCC sont généralement stockés dans des flacons en verre;
- ▶ il faut éviter de transvaser les échantillons: les flacons en verre destinés aux analyses « Headspace » sont remplis sur place;
- ▶ les échantillons d'eau doivent être exempts de bulles d'air. On utilisera un tuyau de petit diamètre (tuyau de bypass) pour remplir les flacons;
- ▶ lorsqu'on remplit une bouteille sans y avoir introduit préalablement un agent conservateur, le tuyau doit aller jusqu'au fond de la bouteille (« méthode par compression »); il faut laisser déborder un peu d'eau avant de refermer la bouteille.

Les mesures visant à garantir la qualité des échantillons d'eau souterraine revêtent une grande importance. A cet effet, il est recommandé de prélever régulièrement des échantillons neutres au moyen de l'équipement complet.

Sources d'erreur lors de l'échantillonnage:

- ▶ contamination de l'échantillon due au nettoyage insuffisant de l'appareillage (p. ex. tuyaux ou câbles);
- ▶ utilisation d'un agent conservateur pollué;
- ▶ contamination par le solvant d'un stylo-feutre;
- ▶ contamination par une substance volatile présente dans l'air ambiant (site industriel actif) ou par les gaz d'échappement d'une génératrice de courant;
- ▶ perte par dégazage d'une substance volatile contenue dans l'échantillon due au stockage dans un flacon non étanche aux gaz ou rempli incomplètement;
- ▶ perte par dégazage d'une substance volatile contenue dans l'échantillon due à l'application d'une technique de prélèvement inappropriée (p. ex. système d'aspiration);

- altération de l'échantillon due à une réaction chimique ou biochimique (p. ex. substances oxydantes ou réductrices contenues dans l'échantillon, activité bactérienne).

Echantillonnage en cas de faible arrivée d'eau

Lorsque l'aquifère est mince ou peu perméable, il faut vider le trou de forage à une ou deux reprises au moins [4]. Si l'on ne peut retirer aucun échantillon représentatif par pompage, on le notera dans le protocole de prélèvement et on en tiendra compte dans l'appréciation du site. Cela s'applique en particulier aux prélèvements avec un tube plongeur.

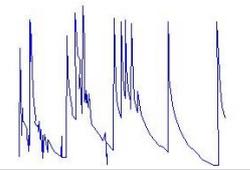
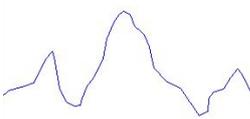
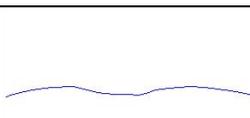
Les HCC étant plus denses que l'eau, ils risquent de s'accumuler à la base du forage (dans le dépotoir) lorsque les conditions sont défavorables, si bien que le mode de prélèvement décrit précédemment fournira des résultats trop élevés. En cas de doute, la qualité de l'échantillonnage peut être améliorée en rinçant le dépotoir au préalable.

Nombre et date des prélèvements :

Le nombre d'échantillons d'eau souterraine qu'il y a lieu de prélever dépend du type d'aquifère. En général, il faut appréhender toutes les situations importantes (hautes, moyennes et basses eaux), car elles peuvent influencer considérablement les émissions de HCC. Le tableau 6 indique le nombre de prélèvements recommandé pour différents types d'aquifères. L'intervalle entre les prélèvements dépend des oscillations du niveau de l'aquifère. Pour relever le spectre de polluants de manière représentative, des mesures s'étalant sur une année ou plus peuvent s'avérer nécessaires selon les oscillations saisonnières.

Tableau 6:

Nombre de prélèvements recommandé pour obtenir des concentrations représentatives de HCC.

Courbe schématique du niveau piézométrique	Réaction du niveau piézométrique aux précipitations	Type d'aquifère (nombreuses formes mixtes également possibles)	Nombre de prélèvements recommandé
	Très rapide, non atténuée	Aquifère karstique ou fissural, aquifère peu profond en terrain meuble, pas de couverture et/ou forte infiltration d'eaux superficielles	3-4, dont 1-2 juste après de fortes précipitations
	Légèrement retardée, légèrement atténuée	Aquifère en terrain meuble typique, situé à une profondeur moyenne et surmonté d'une couverture	2-3, sous des niveaux d'eau aussi différents que possible
	Fortement retardée, fortement atténuée	Aquifère profond en terrain meuble, surmonté d'une couverture épaisse et/ou avec couches intercalaires (aquifères superposés)	2

7.7 Méthodes d'analyse

La teneur en HCC des échantillons prélevés est déterminée en laboratoire selon les méthodes E-8 (échantillons aqueux) ou F-8 (échantillons solides), décrites dans l'aide à l'exécution « Méthodes d'analyse dans le domaine des déchets et des sites pollués » [1]. Les deux méthodes, dans lesquelles les mesures proprement dites sont effectuées par chromatographie en phase gazeuse (GC) ou par chromatographie en phase gazeuse / spectrométrie de masse (GC/MS), satisfont aux normes internationales. Lorsqu'on choisit le laboratoire qui va procéder aux analyses, il faut s'assurer qu'il réponde bien à la directive [1] de l'OFEV.

Certains problèmes particuliers demandent de déroger aux méthodes standard selon [1]. Ces cas seront dûment motivés et décrits.

Le laboratoire d'analyse consigne et documente clairement la préparation, le traitement et l'analyse des échantillons dans un rapport de laboratoire.

Cf. § 7.10
page 60

7.8 Incertitudes lors de l'échantillonnage et de l'analyse des HCC

Les paragraphes précédents ont signalé à plusieurs reprises que les mesures de teneurs en HCC sont entachées d'imprécisions non négligeables. Ces erreurs ne peuvent pas être totalement évitées et on ne peut guère que les limiter. L'interprétation des valeurs mesurées doit donc tenir compte de ces imprécisions.

Les imprécisions imputables aux instruments de mesure utilisés en laboratoire (balances, pipettes, chromatographie en phase gazeuse, etc.) sont celles qu'on peut le mieux estimer. Le prélèvement, le transport et le traitement des échantillons contenant des HCC génèrent des erreurs largement supérieures, qu'on ne peut estimer que sommairement.

7.8.1 Imprécisions lors de l'échantillonnage

Les écarts par rapport aux teneurs effectives en polluants qui se produisent lors de l'échantillonnage sont dus aux facteurs suivants:

Cf. fig. 10 page 40
et § 7.6.3 page 50

► lieu de prélèvement insuffisamment représentatif de la source ou du panache de pollution;

Cf. § 3.8 page 19
et § 7.3.2 page 45

► drainage de HCC liquides suite à la disparition des forces de capillarité due à l'ameublissement d'un échantillon solide;

Cf. § 7.6.5
page 56

► entraînement de HCC par l'outillage de prélèvement;

Cf. § 3.8 page 19
et § 7.3.2 page 45

► pertes par évaporation lors du prélèvement de matière solide; surtout dues à l'échauffement de l'échantillon, inévitable, par exemple, lorsqu'un forage carotté traverse un terrain meuble de granulométrie grossière;

Cf. § 7.3.2
page 45

► pertes par évaporation lors du transport et du stockage de l'échantillon, notamment dues à une réfrigération insuffisante.

Seul l'ordre de grandeur des erreurs dues à la représentativité insuffisante d'un échantillon peut être estimé.

Cf. § 7.3.2
page 45

Lorsqu'on interprète des résultats, il faut tenir compte du fait que les HCC sont généralement répartis très irrégulièrement dans le terrain, car ils se disséminent en empruntant des cheminements préférentiels. On peut ainsi trouver des différences de concentration considérables entre des échantillons solides prélevés à faible distance les uns des autres (p. ex. 0,5 m). Dans les eaux souterraines et dans l'air interstitiel, le comportement des HCC dissous et évaporés suit des règles un peu plus simples, c'est pourquoi les échantillons proches montrent généralement peu de différence, s'ils proviennent de la même couche lithologique.

Lorsqu'on évalue les inexactitudes, il faut tenir compte du fait que le prélèvement, le transport et la préparation des échantillons génèrent uniquement des pertes de HCC, mais jamais des enrichissements.

Cf. § 3.8 page 19
et § 7.3.2 page 45

- ▶ les échantillons solides peuvent perdre jusqu'à 100 % des HCC, en particulier dans le cas des HCC très volatils et si l'échantillonnage n'a pas été réalisé de manière adéquate ;
- ▶ le prélèvement et le transport des échantillons génère moins d'erreurs dans le cas des échantillons d'eau. Ils sont versés dans un flacon prérefroidi, étanche à la diffusion (verre), en étant très peu exposés à l'air ambiant. La chaîne du froid entre le prélèvement de l'échantillon et son analyse doit aussi être continue. Dans le cas des échantillons d'eau, on peut donc partir du principe que l'erreur due à l'échantillonnage est de l'ordre de 20 % si le prélèvement est effectué dans les règles de l'art et si les échantillons sont ensuite refroidis sans interruption. Par contre, l'aménagement des points de mesure et la profondeur de pompage lors du prélèvement des échantillons peuvent avoir une influence bien plus importante sur le résultat dans le cas d'aquifères stratifiés.

7.8.2 Imprécisions lors de l'analyse

En laboratoire, il faut tenir compte des sources d'imprécision suivantes:

- ▶ préparation des échantillons (pertes);
- ▶ erreurs de mesure ou de calibrage.

Les pertes survenant au cours de la préparation sont les plus importantes lorsque des échantillons solides sont fragmentés. En revanche, les échantillons d'eau sont généralement analysés sans qu'ils entrent en contact avec l'air ambiant. Dans le cas des échantillons aqueux ou solides renfermant des HCC, la précision des mesures, calculée lors d'essais interlaboratoires ([13], [16]), est de l'ordre de $\pm 25\%$ à $\pm 40\%$.

7.9 Protocole d'échantillonnage

Les principales exigences à satisfaire par les protocoles d'échantillonnage sont mentionnées dans le document « OFEV (éd.) (2011): Méthodes d'analyse dans le domaine des déchets et des sites pollués. Edition 2016. L'environnement pratique n° 1027. 72 p.» [1]. Plusieurs cantons y ont ajouté leurs propres recommandations pour que les protocoles d'échantillonnage soient aussi complets que possible.

Les échantillons doivent être identifiés sans ambiguïté au moyen de plusieurs critères. Les protocoles d'échantillonnage comprendront au minimum les rubriques suivantes:

- ▶ nom ou désignation du projet;
- ▶ auteur des prélèvements avec signature;
- ▶ lieu, date, heure;
- ▶ désignation des échantillons;
- ▶ description de l'appareillage de prélèvement (pompe, tuyau, sondeuse, etc.);
- ▶ précisions sur les prélèvements (durée, volume pompé [pompage préalable et de prélèvement], stockage, filtrage, etc.);
- ▶ conditions météorologiques (température, précipitations, etc.);
- ▶ profondeur des prélèvements;
- ▶ description des échantillons (odeur, couleur, turbidité [eau]), type de matériau [solide], etc.);
- ▶ paramètres de terrain et description des alentours s'ils présentent des particularités;
- ▶ év. photos précisant certains points.

Les annexes 8a et 8b comprennent des exemples de protocoles d'échantillonnage (eau et matière solide / sol).

7.10 Exigences posées aux laboratoires d'analyse

Les laboratoires d'analyse garantissent, en appliquant correctement des méthodes conformes à la directive [1], que la préparation et l'analyse des échantillons n'induisent que des erreurs minimales, inévitables, dans les résultats. Ils doivent impérativement être accrédités selon la norme SN EN ISO/CEI 17025 pour pouvoir travailler sur les HCC [1].

Les laboratoires d'analyse travaillent selon le système d'assurance qualité SN EN ISO/IEC 17025 [14]. Ils déterminent les valeurs à blanc, étalonnent les appareils et réitérent les mesures en appliquant des standards de qualité internes et externes.

7.10.1 Dialogue entre l'expert et le laboratoire d'analyse

Lorsqu'il confie des analyses au laboratoire, l'expert lui indique les polluants présumés et les concentrations attendues. Muni de ces informations, le laboratoire peut réagir aux particularités éventuelles en procédant à des pesées et dilutions appropriées ou en modifiant la méthode, afin de fournir plus rapidement des résultats fiables.

Le laboratoire indique à l'expert s'il s'écarte de la méthode standard et lui communique ses constatations particulières. Il signale notamment si des échantillons sont transmis à d'autres laboratoires et si le délai entre l'échantillonnage et l'analyse est prolongé du fait d'événements exceptionnels (p. ex. panne d'un appareil).

Lorsque des mesures préliminaires ont été effectuées dans une étape antérieure, le laboratoire et l'expert examinent la plausibilité des résultats si les valeurs obtenues divergent notablement des valeurs attendues.

7.10.2 Contenu du rapport d'analyse

Le rapport d'analyse établi par le laboratoire comprend au moins les informations énumérées dans la directive [1], conformément à la norme SN EN ISO/CEI 17025 [14]. Lorsque les analyses portent sur des HCC, les informations suivantes sont aussi importantes pour que l'expert et les autorités puissent interpréter correctement les résultats en tenant compte des particularités du site, des sondages et des prélèvements:

- date et heure d'arrivée des échantillons au laboratoire;
- précisions sur les méthodes appliquées pour préparer les échantillons;
- description succincte et précise de la méthode d'analyse ou référence à une méthode officielle indiquée dans [1];
- seuil de quantification analytique;
- incertitude de mesure ([13], [16]).

Les données brutes des analyses doivent être archivées par le laboratoire pour permettre de revenir sur les résultats non plausibles en cas de doute. Si on lui en fait la demande, il fournit des détails sur la méthode appliquée, la précision des mesures et l'exécution des analyses.

8 Documentation de l'investigation

Pour être en mesure d'apprécier un site conformément aux art. 9 à 12 OSites, l'autorité a besoin d'un rapport d'investigation consignait d'une manière claire et plausible – avec indication des sources – les résultats obtenus, les conclusions de l'expert et son estimation de la mise en danger. Les exigences suivantes s'appliquent aux rapports d'investigation qui doivent être élaborés dans le cadre de la gestion des sites contaminés. Lorsque les investigations portant sur des HCC sont complexes et coûteux, ces rapports revêtent une importance particulière dans le dialogue entre le détenteur du site, l'expert et l'autorité.

8.1 Exigences posées au rapport d'investigation

8.1.1 Énoncé des objectifs

Au début de son rapport, l'expert énonce les objectifs de l'investigation du site. Les objectifs suivants seront formulés au stade de l'investigation préalable (art. 7 et 8 OSites):

Investigation historique avec cahier des charges pour l'investigation technique

- ▶ Détermination de l'évolution spatio-temporelle des activités polluantes pratiquées sur le site;
- ▶ description des procédés appliqués sur le site qui ont impliqué des HCC;
- ▶ élaboration d'un cahier des charges précisant l'ampleur de l'investigation technique et les méthodes prévues pour mesurer les atteintes aux milieux à protéger importants causées par des HCC.

Investigation technique

- ▶ Type et quantité de polluants sur le site (relevé du foyer de pollution et délimitation rudimentaire du site selon [document d'aide ChloroNet](#))
- ▶ Conditions du sous-sol et conditions d'écoulement des eaux souterraines sur le site
- ▶ Évaluation du besoin de surveillance ou d'assainissement du site ou de parties de celui-ci en vertu des art. 9 à 12 OSites.

Pour comparaison: l'investigation de détail, réalisée lorsqu'un besoin d'assainissement a été établi, poursuit les objectifs suivants (art. 14 OSites):

- ▶ données détaillées concernant le type, l'emplacement, la quantité et la concentration des HCC présents sur le site pollué;
- ▶ identifier le type des atteintes à l'environnement effectives et possibles dues aux foyers de pollution, la charge en cause et l'évolution de ces atteintes dans le temps;
- ▶ identifier l'emplacement et l'importance des milieux environnementaux menacés;
- ▶ apprécier les buts et l'urgence des mesures d'assainissement.

8.1.2 Protocoles de prélèvement

Tous les protocoles de prélèvement (air interstitiel, eau souterraine et matière solide) doivent être annexés au rapport d'investigation. Il ne suffit pas d'en synthétiser les résultats dans des tableaux. Les annexes 8a et 8b comprennent des protocoles types applicables au prélèvement d'eau souterraine et de matière solide.

8.1.3 Rapports de laboratoire

Une copie des rapports de laboratoire originaux doit être annexée au rapport d'investigation. Il ne suffit pas de synthétiser les résultats des analyses dans des tableaux.

Cf. § 7.10.2
page 61 On précisera au laboratoire que ses rapports devront comprendre les informations énumérées à la section 7.10.2.

8.1.4 Illustration des résultats, plans et cartes

Cf. § 8.2
page 64 La lecture et la compréhension des rapports sont grandement facilitées lorsque les résultats des investigations sont représentés graphiquement. Les graphiques suivants sont recommandés:

- ▶ profils géologiques avec position des foyers de pollution;
- ▶ cartes des isohypses: niveau piézométrique dans le périmètre étudié;
- ▶ Plans avec situation des points d'échantillonnage et des piézomètres, et délimitation du site ;
- ▶ cartes de la pollution: concentrations des polluants dans les eaux souterraines, l'air interstitiel et la matière solide; données brutes et interprétation de celles-ci sous la forme de lignes d'égales concentrations (si possible);
- ▶ courbes d'évolution des eaux souterraines (si séries de mesures disponibles: niveau piézométrique, teneur en polluants, etc.).

En général, les courbes d'évolution ne sont pas révélatrices des teneurs en polluants dans l'air interstitiel. L'influence de la pression de l'air est presque insignifiante. C'est pourquoi les mouvements d'air interstitiel sont rarement constants (en débit et en direction) pendant une durée significative.

Cf. § 5.3 page 31
et fig. 8 page 33 L'illustration des résultats de l'investigation historique sous la forme de plan des périmètres étudiés a été traitée à la section 5.3. L'échelle et les intersections de coordonnées doivent être inscrites sur tous les plans.

8.1.5 Conclusions claires

A la fin du rapport d'investigation, l'expert donne son appréciation du site et soumet à l'autorité une évaluation finale selon les art. 9 à 12 OSites ainsi qu'une proposition quant à la suite des travaux. Les conclusions de l'expert doivent être claires et sans ambiguïté.

Pour évaluer le besoin de surveillance ou d'assainissement, voire radier du cadastre des sites pollués, l'autorité a notamment besoin des éléments suivants:

- ▶ un historique complet du site, basé sur des recherches exhaustives (investigation historique), qui indique le type et la quantité des HCC utilisés dans le passé;

Cf. § 5.1
page 24

- Cf. § 5.3
page 31
- Cf. § 4.4
page 23
- ▶ une description détaillée des rejets possibles à partir des installations et des bâtiments;
 - ▶ une description bien documentée des possibilités de dissémination dans la zone non saturée et dans la zone saturée du sous-sol;
 - ▶ une description et une documentation claires des sondages et des échantillonnages effectués;
 - ▶ les résultats des analyses attestant de manière claire et reproductible les immissions de polluants;
 - ▶ une discussion concernant les incertitudes, inévitables lorsqu'on choisit l'emplacement des sondages ainsi que les méthodes de sondage, d'échantillonnage et d'analyse;
 - ▶ un plan décrivant le périmètre du site ;
 - ▶ une appréciation de la mise en danger des milieux à protéger;
 - ▶ une appréciation du site dûment motivée par l'expert et ses propositions concernant la suite éventuelle des travaux.

Au vu de ces contraintes, le rapport de l'expert doit satisfaire aux exigences énumérées ci-après.

8.2 Rapport type

L'expert peut structurer son rapport d'investigation préalable selon un canevas donné. L'application d'un rapport type l'engage vis-à-vis de l'autorité, car toutes les informations nécessaires à l'appréciation du site sont fournies lorsque le canevas est intégralement suivi.

Certaines institutions (CFF, plusieurs cantons) imposent leurs propres rapports types pour l'investigation préalable. En l'absence de canevas fixé, l'expert peut utiliser les exemples de l'annexe 7. Ces « structures types », applicables aux investigations historiques et techniques, ont été établies par le Service de la protection de l'environnement (AfU) du canton d'Uri.

Les différentes sections du présent guide pratique fournissent des précisions quant au contenu des paragraphes figurant dans les rapports types.

Liste bibliographique

Bases légales

LEaux: loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux - RS 814.20.

LPE: loi fédérale du 7 octobre 1983 sur la protection de l'environnement (loi sur la protection de l'environnement) - RS 814.01.

OEaux: ordonnance du 28 octobre 1998 sur la protection des eaux - RS 814.201.

OSites: ordonnance du 26 août 1998 sur l'assainissement des sites pollués par des déchets (ordonnance sur les sites contaminés) - RS 814.680.

OSol: ordonnance du 1^{er} juillet 1998 sur les atteintes portées aux sols - RS 814.12.

OTAS: ordonnance du 26 septembre 2008 relative à la taxe pour l'assainissement des sites contaminés - RS 814.681.

OTD: ordonnance du 10 décembre 1990 sur le traitement des déchets - RS 814.600.

Ouvrages cités

- [1] OFEV (éd.) (2011): Méthodes d'analyse dans le domaine des déchets et des sites pollués. Edition 2016. L'environnement pratique n° 1027. 72 p.
- [2] OFEV (2015): Prélèvement d'échantillons et analyse d'air interstitiel. Sites contaminés – Estimation de la mise en danger. L'environnement pratique.
- [3] OFEFP (2000): Cahier des charges pour l'investigation technique des sites pollués. Sites contaminés – Estimation de la mise en danger. L'environnement pratique.
- [4] OFEFP (2003): Prélèvements d'eau souterraine en relation avec les sites pollués. Sites contaminés – Estimation de la mise en danger. L'environnement pratique.
- [5] [ChloroNet \(éd.\) \(2008\): Guide des hydrocarbures chlorés \(HCC\) – Propriétés et comportement dans l'environnement. Office fédéral de l'environnement, canton de Zurich et canton de St-Gall. Mai 2008, Version septembre 2009.](#)
- [6] Dresdner Grundwasserforschungszentrum e.V. DGFZ (Hrsg.) (2008): Synopse, Systemanalyse, Modellierung und Prognose der Wirkungen natürlicher Schadstoffminderungsprozesse – eine rezente Synopse. KORA-Themenverbund 7: Modellierung, Prognose. - Gemeinsame Mitteilungen des Dresdner Grundwasserforschungszentrum e.V. und seiner Partner, Heft 05/2008, www.dgfz.de/publikationen, ISSN 1611-5627, www.natural-attenuation.de.
- [7] SG DDPS, DPAE (1998): Historische Untersuchung, Pflichtenheft für die Technische Untersuchung von Parzellen mit Altlastenverdacht. Wegleitung vom 29.09.1998.

- [8] Grandel, S., Dahmke, A. (2008): Natürliche Schadstoffminderung bei LCKW-kontaminierten Standorten. KORA-Leitfaden des Themenverbundes 3: Chemische Industrie, Metallverarbeitung. - Christian Albrechts Universität, Kiel (Hrsg.), www.natural-attenuation.de.
- [9] Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie HLUG (Hrsg.) (2000): Untersuchung von altlastverdächtigen Flächen und Schadenfällen. Handbuch Altlasten, Band 3, Teil 2. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie HLUG, Wiesbaden, 2002.
- [10] Kötter, L. (1989): Erfassung möglicher Bodenverunreinigungen auf Altlaststandorten. Kommunalverband Ruhrgebiet.
- [11] Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) (2000): Arbeitshilfe Qualitätssicherung, Juli 2000.
- [12] Schwille, F. (1984): Leichtflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe in porösen und klüftigen Medien – Modellversuche. Besondere Mitteilungen zum Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch Nr. 46. Bundesanstalt für Gewässerkunde.
- [13] SECO, Service d'accréditation suisse SAS (2004): Guide pour la validation des méthodes d'essai chimico-physiques et l'évaluation de l'incertitude de mesure. Document n° 324.fw, édition de juillet 2004, rév. 00.
- [14] ISO & CEI (2005-2007): Prescriptions générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais (SN EN ISO/CEI 17025:2005).
- [15] Tiehm, A., Schmidt, K. R. (2011): Sequential anaerobic/aerobic biodegradation of chloroethenes. Aspects of field application – Current Opinion in Biotechnology 2011, 22:1–7, Elsevier Ltd.
- [16] UBA/BMU, Arbeitsgruppe Qualitätssicherung und Ergebnisunsicherheit für Bodenuntersuchungsverfahren (2008): Angabe der Messunsicherheit bei chemischen Bodenuntersuchungen für den Vollzug der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung. Umweltbundesamt Dessau-Roßlau, März 2008.
- [17] Winkler, A. (2003): Wärme- und Stofftransport in der ungesättigten Bodenzone bei der In-situ-Sanierung mit festen Wärmequellen. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau, H. 115, Universität Stuttgart.

Bibliographie générale

- [18] Betz, C. (1998): Wasserdampfdestillation von Schadstoffen im porösen Medium: Entwicklung einer thermischen in-situ Sanierungstechnologie. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau, H. 97, Universität Stuttgart.
- [19] OFEFP (2004): Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines. L'environnement pratique.

- [20] Landesamt für Umwelt und Geologie Sachsen (1998): Probenahme bei der Technischen Erkundung von Altlasten. Materialien zur Altlastenbehandlung 3/1998: http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/boden/mza3_98.pdf.
- [21] Leverett, M. C. (1941): Capillary behaviour in porous solids. Trans. AIME Pet. Eng. Div., 142, pp. 152–169.
- [22] Reid, R. C., Prausnitz, J. M. & Poling, B. E. (1987): The properties of liquids and gases. McGraw Hill, New York, 4th edition.
- [23] Stephan, K. & Mayinger, F. (1992): Thermodynamik: 1. Einstoffsysteme. Springer, 14. Ausgabe.
- [24] Yaws, C. L. (1999): Chemical properties handbook. McGraw Hill, New York.

Annexe 1: Check-list « Description géologique du sous-sol »

Enumération non exhaustive d'informations importantes, avec indication de descriptions possibles:

Elements anthropiques (installations, remaniements)

Etanchéité	Cf. investigation historique
Remplissages	Remblais, coffrages, pistes de chantier, couches de stabilisation, etc.
Ouvrages hydrauliques	Drainages, installations d'infiltration
Eaux usées	Canalisations, puits perdus, citernes enterrées et autres conduites
Forages	Anciens points de mesure d'eau souterraine, puits de captage

Couches naturelles

Sol (horizons A et B selon l'OSol)

Epaisseur	Manque, mince (< 0,3 m), présent (> 0,3 m)
Constitution	Activité organique faible, importante

Couches de couverture de granulométrie fine

Epaisseur	Manquent, minces (< 2 m), épaisses (2–5 m), très épaisses (> 5 m)
Nature	Terrain meuble, roche karstifiable, autre type de roche
Granulométrie	Argilo-limoneuse, sablo-limoneuse (roche: porosité, degré d'altération, etc.)
Constitution	Hétérogène, homogène, stratification horizontale
Matière organique	Aucune, peu, beaucoup (p. ex. dépôts tourbeux)

Zone non saturée de l'aquifère

Epaisseur	Manque, mince (< 3 m), épaisseur moyenne (3–10 m), épaisse (> 10 m)
Nature	Terrain meuble, roche karstifiable, autre type de roche
Granulométrie	Essentiellement sablo-limoneuse, sableuse, sablo-graveleuse, graveleuse (roche: porosité, degré d'altération, etc.)
Constitution	Hétérogène, homogène, stratification horizontale, stratification oblique
Matière organique	Aucune, peu, beaucoup (p. ex. dépôts tourbeux)
Eaux souterraines	Aucune, lentilles d'eau « flottantes »

Zone saturée de l'aquifère

Aquifères superposés	Un niveau aquifère, deux aquifères superposés, plusieurs aquifères superposés
Niveau de la nappe	Nappe libre, légèrement captive, fortement captive
Profondeur de la nappe	Epaisseur du sol + couches de couverture de granulométrie fine + couches de couverture de granulométrie grossière: profondeur faible (< 3 m), moyenne (3–10 m), grande (> 10 m)
Epaisseur	Faible (< 2 m), moyenne (2–10 m), grande (10–20 m), très grande (> 20 m)
Perméabilité (coefficient k_f)	Très faible (< 10^{-6} m/s), faible (10^{-6} à 10^{-5} m/s), moyenne (10^{-5} à 10^{-4} m/s), élevée (10^{-4} à 10^{-3} m/s), très élevée (> 10^{-3} m/s)
Gradient hydraulique	Faible (< 1%), moyen (1–5 %), fort (> 5 %)
Transmissivité	Produit de l'épaisseur et de la perméabilité
Constitution	Hétérogène, homogène, stratification horizontale, stratification oblique
Matière organique	Aucune, peu, beaucoup (p. ex. dépôts tourbeux)
Couches intercalaires	Plancher de l'aquifère supérieur, etc. Aquifère inférieur, etc.

Aquitard imperméable

Nature	Terrain meuble (TM), roche
Granulométrie (TM)	Argilo-limoneuse, sablo-limoneuse
Constitution (TM)	Homogène, hétérogène, stratification horizontale
Type de roche	Argilite, marne, grès, poudingue, etc.
Zone altérée	Aucune, mince (< 2 m), épaisse (> 2 m)
Fissuration	Aucune, fissures isolées, fissuration importante

Eaux souterraines

Direction, vitesse ^{*)} et gradient d'écoulement
Temps de séjour dans le sous-sol ^{*)}
Caractéristiques chimiques et bactériologiques des eaux souterraines ^{*)}
^{*)} si ces données sont connues et disponibles

Annexe 2: Liste de branches et processus en usage dans ces branches qui ont utilisé des HCC

Type de HCC	1,2-dibromo-éthane	1,1-dichlor-éthane	1,2-dichlor-éthane	1,1-dichlor-éthène	cis-1,2-dichlor-éthène	trans-1,2-dichloréthène	Dichloro-méthane	1,2-dichloro-propane	1,1,2,2-tétrachloréthane	Tétrachlor-éthène	Tétrachloro-méthane	1,1,1-trichlor-éthane	Trichloréthène	Trichloro-méthane	Chlorure de vinyle	
Historique de l'utilisation	1945-2005	Années 1970-~1990	1975-1990	Années 1970-fin des années 1990			Années 1920-2009	Années 1970-~2000	Années 1910-~2001	Années 1970-~2000	Années 1960-1996	Années 1980-1996	Années 1970-1996	Années 1960-~fin des années 1990	Vers 1910-~2000	
Observations	Additif carburant (jusqu'aux années 1990). Interdit depuis 2005 comme pesticide.	Base: chiffre d'une production USA (1977)	Interdit depuis 2005 comme pesticide.	Base: la plus ancienne étude sur ce produit.	Produit de dégradation du TCE. Base: la plus ancienne étude sur ce produit.		Première synthèse en 1840. Interdit courant 2009.	Base: la plus ancienne étude sur ce produit	Base: l'une des premières études révélant la toxicité probable de ce produit.	Première synthèse en 1821. Utilisation interdite ou en cours d'interdiction pour le nettoyage à sec.	Interdit en Europe depuis 1996.	Utilisation fortement limitée dès 1996 (Protocole de Montréal) interdite dès 2000. Production interdite dès 1996.	Classé probablement cancérigène en 1995 par l'IARC. Base: production mondiale 1978-1980. Progressivement remplacé.	Usage en régression.	Produit de dégradation du TCE. Première synthèse en 1835. Interdit depuis 2005 comme pesticide.	
Automobile	+	+	+	+			+	+	+	++	+	++	++			
	Activité pouvant entraîner des pollutions par des HCC															
	Lavage et nettoyage de véhicules			Lavage de véhicules												
				Lavage de moteurs et de châssis												
	Installation de lavage de véhicules			Installation de lavage de véhicules												
	Travaux de carrosserie			Travaux de peinture												
Production de textiles, vêtements et lavage		+		+	+	+	++	+	+	++	+	++	++			
	Activité pouvant entraîner des pollutions par des HCC															
	Apprêtage des tissus			Nettoyage chimique												
	Impression			Préparation de pâtes d'impression par mélange de colorants												
Blanchisserie, nettoyage à sec					+	+	+	+		++	+	+	+			
	Activité pouvant entraîner des pollutions par des HCC															
	Nettoyage chimique			Nettoyage dans le tambour												
	Récupération des solvants			Filtration			Filtration du solvant souillé									
							Distillation du solvant souillé									
							Condensation du solvant à partir de l'air									
	Entreposage			Purification de l'air sortant			Elimination du solvant présent dans l'air sortant des machines au moyen d'une installation au charbon actif ou par condensation à basse température									
							Eau de réfrigération injectée directement dans le mélange air/solvant									
							Régénération du charbon actif					Récupération du solvant fixé sur le charbon actif au moyen de vapeur d'eau				
Industrie du bois		+		+			+	+	+	+	+	++	+			
	Activité pouvant entraîner des pollutions par des HCC															
	Apprêtage			Nettoyage												
				Dégraissage												
				Mordançage												

Type de HCC	1,2-dibromo- éthane	1,1-dichlor- éthane	1,2-dichlor- éthane	1,1-dichlor- éthène	cis-1,2-dichlor- éthène	trans-1,2- dichloréthène	Dichloro- méthane	1,2-dichloro- propane	1,1,2,2,-tétra- chloréthane	Tétrachlor- éthène	Tétrachloro- méthane	1,1,1-trichlor- éthane	Trichloréthène	Trichloro- méthane	Chlorure de vinyle
	Peinture, impression														
	Imprégnation, conservation														
	Laquage														
	Revêtement du bois														
	Placages Feuilles de décor Feuilles de base Feuilles de PVC Feuilles de polyoléfines														
Produits en ciment, chaux, plâtre, béton, génie civil et construction, entreprises de construction	+														
	Activité pouvant entraîner des pollutions par des HCC														
	Protection antirouille, protection anticorrosion d'éléments en acier et en fer														
	Imprégnation du bois														
	Entreposage de substances polluantes														
	Nettoyage avec des substances polluantes														
Construction de fourneaux en catelles et cheminées	+														
	Activité pouvant entraîner des pollutions par des HCC														
Produits en céramique, fabrications en verre	+														
	Activité pouvant entraîner des pollutions par des HCC														
	Production ou travail de verres avec des additifs polluants														
	Nettoyage avec des substances polluantes														
Horlogerie, mécanique de précision	+														
	Activité pouvant entraîner des pollutions par des HCC														
	Travail des métaux														
	Traitement des métaux														
	Assemblage et réparation														
	Peinture														
	Travail des plastiques														
Production et transformation de métaux non ferreux, fonderie	+														
	Activité pouvant entraîner des pollutions par des HCC														
Affinage, traitement de surface															

Type de HCC	1,2-dibromo-éthane	1,1-dichlor-éthane	1,2-dichlor-éthane	1,1-dichlor-éthène	cis-1,2-dichlor-éthène	trans-1,2-dichloréthène	Dichloro-méthane	1,2-dichloro-propane	1,1,2,2,-tétra-chloréthane	Tétrachlor-éthène	Tétrachloro-méthane	1,1,1-trichlor-éthane	Trichloréthène	Trichloro-méthane	Chlorure de vinyle	
Acierie, atelier de laminage	+	+	+	+			+	+	+	++	+	++	++			
	Activité pouvant entraîner des pollutions par des HCC															
	Usinage	Dégraissage de pièces														
	Trempe	Préparation des pièces														
Laminage avec lubrifiant huileux	Nettoyage de pièces															
Construction de machines pour la production, construction de machines de bureau et d'installations informatiques	+	+		+	+	+	++	+	+	++	+	++	++	+		
	Activité pouvant entraîner des pollutions par des HCC															
	Usinage	Dégraissage de pièces														
	Traitement des métaux	Dégraissage														
	Laquage	Peinture au pistolet (sans cabine de laquage)														
		Installation de filtration														
	Nettoyage	Ponçage														
Dégraissage																
Travail du bois et des plastiques	Travail du bois															
	Travail des plastiques															
Construction de machines et véhicules, machines et tracteurs agricoles, machines pour la construction	+	+	+	+			+	+	+	++	+	++	++			
	Activité pouvant entraîner des pollutions par des HCC															
	Usinage	Dégraissage de pièces														
	Traitement des métaux	Dégraissage														
	Laquage, peinture	Peinture au pistolet														
		Installation de filtration														
	Nettoyage de pièces	Nettoyage de carrosserie														
Travail du bois et des plastiques	Travail du bois															
	Travail des plastiques															
Maintenance et réparation de moteurs ou machines avec de l'huile hydraulique	Nettoyage de carrosseries															
	Nettoyage de châssis et de moteurs															
Atelier de composition et de reproduction graphique, imprimerie, reliure	+	+		+	+	+	++	+	+	++	++	++	++			
	Activité pouvant entraîner des pollutions par des HCC															
	Utilisation de clichés et de plaques d'impression	Nettoyage														
	Composition d'images	Photoreproduction														
		Développement														
		Séchage														
		Lithographie														
Impression	Reproduction															
	Stéréotypie au caoutchouc															
	Stéréotypie synthétique															
Galvanoplastie	+	+	+	+			+	+	+	++	+	++	++			
	Activité pouvant entraîner des pollutions par des HCC															
	Préparation	Dégraissage et nettoyage														

Type de HCC	1,2-dibromo- éthane	1,1-dichlor- éthane	1,2-dichlor- éthane	1,1-dichlor- éthène	cis-1,2-dichlor- éthène	trans-1,2- dichloréthène	Dichloro- méthane	1,2-dichloro- propane	1,1,2,2,-tétra- chloréthane	Tétrachlor- éthène	Tétrachloro- méthane	1,1,1-trichlor- éthane	Trichloréthène	Trichloro- méthane	Chlorure de vinyle	
Industrie chimique, production de matières synthétiques et d'articles en caoutchouc	+	+	++	+	+	+	++	+	+	+	+	+	+	+	+	
	Activité pouvant entraîner des pollutions par des HCC															
	Fabrication de produits chimiques															
	Fabrication de produits capillaires															
	Fabrication de cosmétiques															
	Fabrication de produits synthétiques de lutte contre les ravageurs et pour les plantes															
	Fabrication de couleurs et de vernis															
	Fabrication de savon															
	Fabrication de lessive															
	Fabrication de produits synthétiques de base															
	Fabrication de mousses synthétiques, de matières synthétiques renforcées, remplies, plastifiées, colorées et spéciales															
Fabrication d'articles en caoutchouc																
Fabrication de cellophane																
Production d'articles en cuir et de chaussures	+	+		+			+		+	++	+	++	++			
	Activité pouvant entraîner des pollutions par des HCC															
	Retannage															
	Travail de la gomme															
	Traitement de surface															
Production de cuirs vernis																
Papeterie et cartonnerie	+	+	+	+	+	+	+	+	+	++	+	++	++	++		
	Activité pouvant entraîner des pollutions par des HCC															
	Production mécanique de papiers et cartons															
	Apprêtage chimique des surfaces															

Type de HCC	1,2-dibromo- éthane	1,1-dichlor- éthane	1,2-dichlor- éthane	1,1-dichlor- éthène	cis-1,2-dichlor- éthène	trans-1,2- dichloréthène	Dichloro- méthane	1,2-dichloro- propane	1,1,2,2,-tétra- chloréthane	Tétrachlor- éthène	Tétrachloro- méthane	1,1,1-trichlor- éthane	Trichloréthène	Trichloro- méthane	Chlorure de vinyle
Commerce de détail de carbu- rants et combus- tibles liquides, station-service	+		+					+		+					
Commerce de gros de produits pétroliers	+		+					+		+					
Industrie du pétrole	+	+	+	+			+	+	+	+	+	++	++		
Commerce de gros / de détail	*														
Réparation des biens de consommation		+		+	+	+	+		+	++	+	++	++		
Commerce de gros de fer, acier, métaux non ferreux, produits semi- finis de métaux, produits de métaux	+	+	+	+	+	+	+	+	+	++	+	++	++		
Electrotechnique, électronique, mécanique de précision, optique		+		+	+	+	++	+	+	++	+	++	++	+	
Commerce de récupération	*														

Légende:

++: probable

+: possible

vide: improbable

*: dans le commerce de gros, de détail et de récupération, l'utilisation éventuelle d'hydrocarbures chlorés est très variable, car elle dépend directement des substances et des produits vendus. En général, leur utilisation revêt la même importance que dans les branches avec lesquelles la société concernée a commercé.

Annexe 3: Check-list « Archives publiques »

Source d'information	Source disponible	Période couverte	Lacunes	Remarques
Cadastre des sites pollués (CSP)				
Cadastre des sites potentiellement contaminés (CSPC)				
Documents disponibles (avis, décisions, évaluations, etc.)				
Cadastre de l'industrie et de l'artisanat (IGK)				
Extraits du registre foncier				
Etablissement d'assurance des bâtiments				
Autres archives importantes (p. ex. eaux usées) selon le canton				
Plans cadastraux, données topographiques				
Photos aériennes				
Cadastre des citernes				
Données d'accidents (rapports de police, etc.)				

Annexe 4: Check-list « Sources d'information internes à l'entreprise »

Source d'information	Source disponible	Période couverte	Lacunes	Remarques
Visite de l'entreprise (quand, où, avec qui, etc.)				
Propriétaire foncier et détenteur de l'établissement (ancien/nouveau)				
Directeur, collaborateur, gardien, etc. (position, activité, durée)				
Voisins				
Archives de l'entreprise, plaquettes, comptes rendus dans les médias, photos, etc.				
Produits consommables (liste des stocks)				
Documentation concernant les déchets				
Plans des lignes et des conduites				
Plans des canalisations				
Plans de construction, fournisseurs, clients				
Permis de construire et d'exploitation				
Rapports d'accidents majeurs				
Dossiers d'accidents internes				

Exemple de check-list « Sources d'information internes à l'entreprise »

Source d'information	Source disponible	Période couverte	Lacunes	Remarques
Cadastre des sites potentiellement contaminés (CSPC)	Oui	1973-1989	Activités antérieures et postérieures non inscrites	Indices de pollutions connues
Cadastre des sites pollués (CSP)	Non	-	-	Site pas encore inscrit dans le CSP
Visite de l'entreprise	Oui	Toute la période	Aucune information sur le secteur ouest	Visites les 21 et 25.03, avec les personnes suivantes: ...
Collaborateur X	Oui	1968-1998	-	30 ans de travail dans le traitement de surfaces
...				

Annexe 5: Guide pour l'investigation historique

Cette liste de points à étudier n'est pas exhaustive. On la complètera par d'autres éléments spécifiques, selon la nature et la taille de l'entreprise.

Entreprise

- ▶ Propriété: propriétaires successifs de toutes les parcelles concernées
- ▶ Branche
- ▶ Nombre de collaborateurs (autrefois, aujourd'hui)
- ▶ Evolution des constructions
- ▶ Procédés techniques mis en œuvre
- ▶ Description des produits
- ▶ Tous les sites de production sont connus et peuvent être décrits?
- ▶ Réactifs, sous-produits, etc.
- ▶ Techniques de nettoyage (tout ce qui a été traité et nettoyé)
- ▶ Exploitation « sèche », avec de l'eau ou d'autres liquides (solvants oui/non?)
- ▶ Jalons: introduction de nouveaux produits, réorganisations, etc.

Périmètre

- ▶ Premier aménagement
- ▶ Remblais artificiels
- ▶ Incidents
- ▶ Assainissements (partiels) déjà réalisés
- ▶ Périmètre contigu et particularités

Bâtiments

- ▶ Année de construction
- ▶ Affectation (y compris changements)
- ▶ Caves
- ▶ Attribution aux processus
- ▶ Nature du sol (béton, etc.)
- ▶ Etat du sol (fissures, propreté, etc.)
- ▶ Revêtements de protection / étanchéité
- ▶ Drainages / écoulements au sol

Incidents

- ▶ Type (incendie, inondation, etc.)
- ▶ Utilisation d'eau d'extinction?
- ▶ Décombres d'incendie?
- ▶ Substances concernées
- ▶ Rapports
- ▶ Mesures d'assainissement

Eaux usées

- ▶ Type et pollution
- ▶ Où sont-elles acheminées?
- ▶ Séparation domestique / industrielle?
- ▶ Canalisations
- ▶ Installations de purification, y compris procédés mis en œuvre
- ▶ Décanteur, production de boue, etc.

Air évacué

- ▶ Type et pollution
- ▶ Où est-il acheminé?
- ▶ Danger d'accumulation à l'extérieur

Déchets

- ▶ Type et pollution
- ▶ Entreposage
- ▶ Traitement
- ▶ Elimination

Machines

- ▶ Description de l'emplacement
- ▶ Refroidissement (agent réfrigérant, type de circuit, etc.)
- ▶ Entretien
- ▶ Graissage
- ▶ Suintements et mesures de confinement
- ▶ Atelier
- ▶ Installations périphériques (compresseurs, monte-charges, transformateurs, etc.)
- ▶ Installations hydrauliques (parties enterrées)

Livraison / transbordement

- ▶ Nature des marchandises
- ▶ Transbordement [en t/an] avec extensions et réductions
- ▶ Voies de transbordement
- ▶ Suintements possibles

Lieux de stockage

- ▶ Substances stockées, liquides spéciaux
- ▶ Quantités
- ▶ Ouvrages de protection
- ▶ Ecoulements
- ▶ Couvert / étanchéité en plein air
- ▶ Dépôt spécial

Citernes

- ▶ Type et taille
- ▶ Plan de situation
- ▶ Conduites / tuyauterie
- ▶ Mesures de confinement
- ▶ Désaffectation / nettoyage

Installations périphériques

- ▶ Chauffage
- ▶ Transformateurs / condensateurs
- ▶ Compresseurs
- ▶ Installations frigorifiques
- ▶ Entretien des véhicules
- ▶ Voies ferrées

Zone extérieure

- ▶ Etanchéité
- ▶ Dépôts
- ▶ Suintements possibles
- ▶ Ancienne fosse, remblai, etc.

Annexe 6: Questions spécifiques aux HCC

Catalogue de questions propres au nettoyage chimique

- ▶ Indiquer les types de machines utilisés actuellement et autrefois sur le site. Joindre si possible leurs fiches techniques.
- ▶ Décrire l'étanchéité de l'emplacement des machines, en notant tout particulièrement la présence ou l'absence d'une cuve en acier (durant toute la période de production).
- ▶ Décrire l'étanchéité des alentours. Peut-on exclure tout suintement au voisinage immédiat des machines à laver?
- ▶ Décrire la manutention des solvants et des détergents (stockage, transvasement, vidange, etc.).
- ▶ Indiquer les volumes produits et la consommation de matière première.
- ▶ Enumérer les autres dépôts de solvants se trouvant hors du périmètre des machines à laver.
- ▶ Décrire et évaluer le confinement des aires de stockage, des stations de transvasement et des conduites (comme à l'emplacement des machines).
- ▶ Traitement / recyclage des solvants: indiquer le type, l'emplacement et l'étanchéité.
- ▶ Indiquer le traitement de l'air extrait et l'endroit où il est évacué (toit ou paroi extérieure), décrire les alentours.
- ▶ Indiquer le traitement et le cheminement de l'eau entrée en contact avec des HCC.
- ▶ Indiquer le tracé des canalisations (avant et maintenant).

Catalogue de questions propres au dégraissage industriel

- ▶ Indiquer le type de processus: bains de HCC susceptibles de polluer l'environnement ou dégraissage manuel moins préjudiciable? En cas de dégraissage manuel utilisant des cuves de petites dimensions, en préciser la contenance et l'emplacement.
- ▶ Décrire les installations utilisées actuellement et autrefois sur le site. Joindre si possible leurs fiches techniques.
- ▶ Indiquer la contenance des cuves de dégraissage.
- ▶ Indiquer les types de machines utilisés actuellement et autrefois: système ouvert, semi-ouvert ou fermé (génération des machines).
- ▶ Décrire l'étanchéité de l'emplacement des machines, en notant tout particulièrement la présence ou l'absence d'une cuve en acier (durant toute la période de production).
- ▶ Décrire l'étanchéité des alentours. Peut-on exclure tout suintement au voisinage immédiat des bains de dégraissage?
- ▶ Décrire la manutention des solvants et des détergents (stockage, transvasement, vidange, etc.).
- ▶ Enumérer les autres dépôts de solvants se trouvant hors du périmètre des bains de dégraissage.
- ▶ Décrire et évaluer le confinement des aires de stockage, des stations de transvasement et des conduites (comme à l'emplacement des installations).
- ▶ Traitement / recyclage des solvants: indiquer le type, l'emplacement et l'étanchéité.
- ▶ Indiquer le traitement de l'air extrait et l'endroit où il est évacué (toit ou paroi extérieure), décrire les alentours.
- ▶ Indiquer le tracé des canalisations (avant et maintenant).

Annexe 7a: Rapport type pour l'investigation historique

La structure suivante s'inspire largement des dispositions des aides à l'exécution [3] et [7] ainsi que des prescriptions des CFF SA (www.sbb-altlasten.ch).

Chapitre/section	Contenu	Commentaires, exemples	
0	Résumé	Description et appréciation succinctes du site, suite des travaux	Seulement en cas d'investigations complexes, max. une page.
1 Etat des lieux et buts			
1.1	Mandat	Mandant, date d'adjudication, conditions générales	
1.2	Etat des lieux	Objet à étudier, référence à l'inscription au cadastre des sites pollués (CSP) Motif et urgence de l'investigation	Commune, n° de parcelle, n° d'objet CSP avec résumé de la fiche, propriétaire, extrait du CSP (annexe) Motifs possibles: projet de construction, changement de propriétaire, atteinte à l'environnement décelée, etc.
1.3	Buts	But principal: conclusions claires selon l'art. 6, al. 2, let. a, OSites (inscription au CSP?) et les art. 7-8 OSites (investigation préalable pour apprécier le besoin de surveillance et d'assainissement), év. buts propres au projet	Le site est-il pollué ou non? Le cas échéant, doit-il être surveillé ou assaini?
1.4	Investigations antérieures	Résumé des investigations déjà effectuées	Etudes du site pollué, rapports géotechniques et (hydro)géologiques, etc. Citation correcte des rapports (auteur, année, titre, etc.).
2 Description du site			
2.1	Description du site	Description du périmètre, des bâtiments, étanchéités (types et état), drainages (canalisations, séparateurs d'huile [âge!], puits perdus, etc.) et alentours; état des dalles et des installations importantes; affectations actuelles et év. prévues	Une personne ne connaissant pas les lieux doit pouvoir se faire une bonne image de la situation locale. Fissures, joints, défauts locaux d'étanchéité.
2.2	Situation (hydro)géologique	Conditions géologiques Eaux souterraines et autres occurrences d'eau (nappe de versant, etc.)	Constitution des terrains meubles, position du toit de la roche, perméabilités, etc. Aquifère, profondeur, épaisseur, plancher imperméable, direction d'écoulement.
2.3	Milieus à protéger	Emplacement, exposition et état des eaux souterraines, des eaux du surface, du sol et de l'air Emplacement et exposition des objets à protéger	Appréciation des quatre milieux à protéger (même s'ils ne sont pas tous cruciaux). Captages d'eau potable ou de consommation, terres cultivées, air ambiant, etc.

Chapitre/section	Contenu	Commentaires, exemples	
3	Investigation historique		
3.1	Procédure	Activités de recherche d'informations	Liste des sources consultées (documents, archives, etc.) Désignation des témoins interrogés (y c. fonction, adresse, période couverte).
3.2	Documents exploités	Etudes de la pollution du site, études et cartes géologiques et hydrogéologiques, expertises géotechniques, chroniques locales, etc.	Citation correcte des rapports (auteur, année, titre, év. mandant, etc.) ou liste de références à la fin du rapport (avec renvois dans le texte dans les deux cas).
3.3	Historique du périmètre	Historique des constructions, év. étapes d'agrandissement	Constructions existantes, év. constructions aujourd'hui disparues.
3.4	Historique de l'affectation	Description des affectations actuelles et antérieures Description et localisation de toutes les activités polluantes	Types d'affectations et périodes correspondantes. Description exacte des activités et des installations utilisées.
3.5	Substances et produits utilisés	Substances dangereuses pour l'environnement Lieux de stockage, produits entreposés Déchets liquides et solides produits dans l'exploitation actuelle et antérieure	Quantités annuelles (év. estimées), encore utilisées ou non Quoi, où, comment (étanchéité, cave, récipients, agrandissement de citernes, etc.), quelles quantités avec périodes, substances dangereuses pour l'environnement, déchets / déchets spéciaux, autres produits entreposés (même si inoffensifs pour l'environnement) Quantités annuelles (év. estimées), encore présentes ou non.
3.6	Accidents, fuites	Liste des incidents susceptibles d'occasionner une pollution	Liste complète avec description succincte, fuites dans des niveaux superficiels ou dans des tuyaux y passant (p. ex. canalisations, conduites électriques).
3.7	Informations manquantes	Lacunes repérées Lacunes devant être comblées dans le cadre de l'investigation technique Evaluation résumée	P. ex. productions très anciennes, substances utilisées autrefois. Evaluation résumée de l'exhaustivité et de la fiabilité des données.
4	Matrice d'investigation		
	Matrice d'investigation	Tableaux regroupant les principales conclusions de l'investigation historique	Présentation selon [3]; tous les polluants mentionnés dans la matrice sont traités en détail dans l'IH. Délimitation de secteurs selon le plan des périmètres à étudier (en annexe).

Chapitre/section	Contenu	Commentaires, exemples
5	Programme d'investigation¹	
5.1	Programme d'investigation	Programme d'investigation basé sur les résultats de l'investigation historique
		Subdivision en secteurs comme pour la matrice d'investigation.
5.2	Programme de sondage	Buts, nombre, type, emplacement, profondeur, équipement, etc., des sondages
		Présentation selon [3]. Fouille à la pelle mécanique, forage par carottier rotatif / battu, équipement comme piézomètre.
5.3	Programme d'échantillonnage	Buts, nombre, emplacement et type des échantillons, quantité prélevée, profondeur, technique et fréquence des prélèvements
		Présentation selon [3]; en cas de prélèvement d'eau souterraine, au moins deux campagnes d'échantillonnage.
5.4	Programme d'analyse	Liste détaillée des paramètres, méthodes d'analyse
		Présentation selon [3].
5.5	Mesures de protection personnelle	Mesures de protection personnelle éventuellement exigées lors des sondages, prélèvements et analyses
		Gants, masque, protection contre les explosions, etc.
5.6	Étapes	Proposition d'une procédure par étapes: la décision d'entreprendre une étape dépend des résultats des étapes antérieures
		P. ex. fractionner les sondages en cas de pollution par des hydrocarbures: fouilles à la pelle mécanique puis forages dans les eaux souterraines si pollution importante. Fractionner les analyses: couche supérieure puis couche suivante si pollution importante.
5.7	Représentativité des résultats	Domaines de validité, extrapolations possibles, fiabilité des conclusions
		L'IT qui s'ensuit doit fournir des résultats significatifs et probants, permettant d'apprécier définitivement le site selon l'OSites.
6	Résumé de l'appréciation	
	Résumé de l'appréciation	Appréciation du site
		Peut-on apprécier définitivement le site selon l'OSites? Si oui: classement selon l'OSites. Si non: que manque-t-il? Vérification: le programme d'investigation proposé permet-il d'atteindre les buts fixés?
7	Suite des travaux	
	Suite des travaux	Recommandations de l'expert
		Recommandations au mandant (p. ex. transmettre le rapport au service compétent, étapes suivantes). Recommandations à l'autorité compétente (p. ex. examiner et approuver le cahier des charges, adapter l'inscription au CSP).

¹ Lorsque les résultats de l'investigation historique permettent de classer définitivement un site selon l'OSites, si bien qu'aucune investigation technique n'est nécessaire, le chapitre 5 n'a pas lieu d'être. Il est remplacé par un chapitre « Estimation de la mise en danger » (voir le rapport type concernant l'investigation technique à l'annexe 7b).

Chapitre/section	Contenu	Commentaires, exemples
Annexes		
	<ul style="list-style-type: none">▶ Plan d'ensemble à l'échelle 1:25 000 ou 1:10 000 avec la topographie.▶ Extrait de la carte de protection des eaux à l'échelle 1:25 000 (en plus: extrait de la carte des eaux souterraines à l'échelle 1:25 000, si elle existe).▶ Plan de situation ou de détail, généralement à l'échelle 1:500 ou 1:1000 (comprenant au minimum une indication des coordonnées, du nord et de la direction d'écoulement des eaux souterraines, ainsi qu'une délimitation claire des périmètres potentiellement pollués). Tous les lieux et installations importants mentionnés dans le texte doivent figurer sur le plan.▶ Plan des périmètres à étudier avec les sondages prévus (éventuellement combiné avec le plan de situation).▶ Extrait de cadastre (cadastre cantonal des sites pollués, etc.).▶ Dossier photographique (facultatif).▶ Eventuellement, autres documents utiles tels que photos aériennes, plans et photos historiques, plan des canalisations, schémas de production ou listes d'inventaires.	

Annexe 7b: Rapport type pour l'investigation technique

La structure suivante s'inspire largement des prescriptions des CFF SA (www.sbb-altlasten.ch).

Chapitre/section	Contenu	Commentaire, exemples	
0	Résumé	Description et appréciation succinctes du site, suite des travaux	Seulement en cas d'investigations complexes, max. une page.
1 Etat des lieux et buts			
1.1	Mandat	Mandant, date d'adjudication, conditions générales	
1.2	Etat des lieux	Objets à étudier Motif et urgence de l'investigation	Commune, n° de parcelle, n° d'objet CSP, propriétaire. Motifs possibles: projet de construction, changement de propriétaire, atteinte à l'environnement décelée, etc.
1.3	Buts	But principal: conclusions claires selon l'art. 6, al. 2, let. a, OSites (inscription au CSP?) et les art. 8-12 OSites (besoin de surveillance ou d'assainissement?) év. buts propres au projet	Le site doit pouvoir être apprécié définitivement au terme de l'IT: <ul style="list-style-type: none"> • Site non pollué? • Site pollué ne nécessitant ni surveillance ni assainissement? • Site pollué nécessitant une surveillance? • Site pollué nécessitant un assainissement?
1.4	Investigations antérieures	Résumé des investigations déjà effectuées	Résumé des informations importantes, y compris des conclusions de l'IH.
1.5	Documents exploités	Etudes de la pollution du site, études géologiques et hydrogéologiques, expertises géotechniques, chroniques locales, etc.	Citation correcte des rapports (auteur, année, titre, év. mandant, etc.) ou liste de références à la fin du rapport (avec renvoi dans le texte dans les deux cas).
2 Investigations réalisées			
2.1	Sondages	Description des sondages	Types de sondages (forages carottés, fouilles à la pelle mécanique, échantillons de sol selon l'OSol, etc.), technique, profondeur, emplacement, plan de situation et profil des sondages (annexe), protocoles de forage (annexe).
2.2	Echantillonnages	Description des prélèvements	Matériaux / couches échantillonnés, profondeur, technique, quantité, préparation, conservation, échantillons de réserve, documentation des mesures de terrain, protocoles de prélèvement d'échantillons (en annexe); il ne suffit pas de renvoyer aux protocoles!
2.3	Analyses	Description du programme d'analyse	Types d'analyses, paramètres analysés.

Chapitre/section	Contenu	Commentaire, exemples	
3 Résultats des investigations			
3.1	Description complémentaire du site	Renseignements complémentaires acquis lors de l'investigation technique	Constitution du sous-sol, conditions hydrogéologiques, nouveaux renseignements concernant l'historique du périmètre, etc.
3.2	Propriétés organoleptiques	Description des particularités organoleptiques	Couleurs particulières, odeur, pollution visible
3.3	Résultats des analyses	Compilation et interprétation des résultats des analyses	Tableaux regroupant les principaux résultats, dépouillement et interprétation des résultats, évaluation de leur représentativité, estimation et prise en compte des erreurs (prélèvement, transport au laboratoire, préparation et analyse des échantillons), lacunes Rapports de laboratoire (annexe) et év. méthodes d'analyse (annexe).
3.4	Milieux à protéger	Emplacement, exposition et état des milieux à protéger	Mise à jour de l'appréciation des milieux à protéger suite à l'investigation technique.
4 Estimation de la mise en danger			
4.1	Potentiel de pollution	Type et quantité de polluants	Enoncés qualitatifs et quantitatifs concernant les polluants trouvés, emplacement et ampleur des pollutions, plan de la contamination (annexe).
4.2	Potentiel de dissémination	Evaluation des rejets de polluants	Evaluation des atteintes aux milieux à protéger touchés (ou du danger concret de telles atteintes), en tenant compte de la mobilité (solubilité, adsorption), de la dégradabilité et du degré de dégradation des polluants.
5 Appréciation du site selon l'OSites			
	Appréciation selon l'OSites	Appréciation du site conformément à la législation sur les sites contaminés	Classement définitif du site selon l'OSites, proposition visant à adapter ou compléter l'inscription au CSP.
6 Suite des travaux			
	Suite des travaux	Recommandations de l'expert	En cas de besoin de surveillance ou d'assainissement, indications en vue de planifier <ul style="list-style-type: none"> • une investigation de détail ou • une surveillance. Recommandations au mandant (p. ex. transmettre le rapport au service compétent, étapes suivantes). Recommandations à l'autorité compétente (p. ex. classer le site selon l'OSites).

Annexes

- ▶ Plan de situation ou de détail, généralement à l'échelle 1:500 ou 1:1000 (comprenant au minimum une indication des coordonnées, du nord et de la direction d'écoulement des eaux souterraines, ainsi que les isohypses de la nappe souterraine).
- ▶ Plan avec le périmètre du site.
- ▶ Plan des sondages effectués avec représentation de la pollution, comprenant les principaux résultats de mesures (plan de la contamination).
- ▶ Profil des sondages: profil des forages et des fouilles géologiques à la pelle mécanique, avec description des couches rencontrées et interprétation.
- ▶ Protocoles de prélèvement d'échantillons.
- ▶ Rapports de laboratoire avec indication des limites d'erreur (préparation, mesures).
- ▶ Méthodes d'analyse (si différentes de la directive de l'OFEV [1]).
- ▶ Eventuellement, protocoles de forage et d'essais de pompage, dossier photographique.

Annexe 8a: Protocole de prélèvement d'eau souterraine

Investigation:	
• N° de mandat:	
• Désignation:	
N° d'échantillon:	Date:

Données générales sur le point d'eau	
Nom, n° du point d'eau:	
<input type="checkbox"/> source	<input type="checkbox"/> piézomètre <input type="checkbox"/> puits, captage
<input type="checkbox"/> réseau d'eau	<input type="checkbox"/>
Nom de l'aquifère:	
Localité, commune:	
Coordonnées:	
Cote du terrain:	m s.m.
Cote du point de prélèvement:	m s.m.

Contexte du prélèvement	
Date, heure:	
Conditions météo: <input type="checkbox"/> beau	<input type="checkbox"/> nuageux
<input type="checkbox"/> pluie	<input type="checkbox"/> neige <input type="checkbox"/> tempête
Température de l'air: °C	
<input type="checkbox"/> Remarques et croquis au verso	

Données sur le puits, forage ou piézomètre	
Diamètre intérieur du tubage et de la crépine:	
<input type="checkbox"/> acier	<input type="checkbox"/> acier inox <input type="checkbox"/> PE <input type="checkbox"/> PVC
Pt de référence:	m s.m.
Tube aveugle: de	à m/pt réf.
Tube crépiné: de	à m/pt réf.
Niveau statique:	m/pt réf.
Volume d'eau dans le tubage:	litres
Purge préalable: <input type="checkbox"/> oui	<input type="checkbox"/> non
Si oui: date, durée et volume:	

Données sur la pompe	
Type:	
Profondeur lors du prélèvement:	m/pt réf.
Tube, tuyau: <input type="checkbox"/> acier	<input type="checkbox"/> acier inox
<input type="checkbox"/> PE	<input type="checkbox"/> PVC <input type="checkbox"/> PTFE <input type="checkbox"/>
Diamètre: int.:	mm, ext.: mm

Données sur le matériel de prélèvement	
Type de matériel utilisé:	
Tube, tuyau:	
Nettoyage entre prélèvements:	
<input type="checkbox"/> Remarques et croquis au verso	

Mesures durant le prélèvement								
Début: Date:		Heure:		Niveau de l'eau: [m/pt réf.]				
Heure	Niveau [m/pt réf.]	Débit [l/min]	Volume pompé [l]	T [° C]	K [µS/cm]	pH	O ₂ [mg/l]	Remarques (turbidité, couleur, odeur, etc.)
								← Prélèvement

Echantillons d'eau						
Provenance des flacons:			Flacons nettoyés par:			
Numéro	Volume [l]	Type de flacon	Filtration	Stabilisation	Absence de bulles	Paramètres à mesurer

Mesures après le prélèvement	
Durée totale du pompage:	[h, min] Niveau de l'eau: [m/pt réf.]

Auteur du prélèvement		Transport: <input type="checkbox"/> réfrigéré, T °C	
• Nom:		Stockage: lieu, durée, T: °C	
• Date, visa:		Livraison au laboratoire (date, heure, visa):	

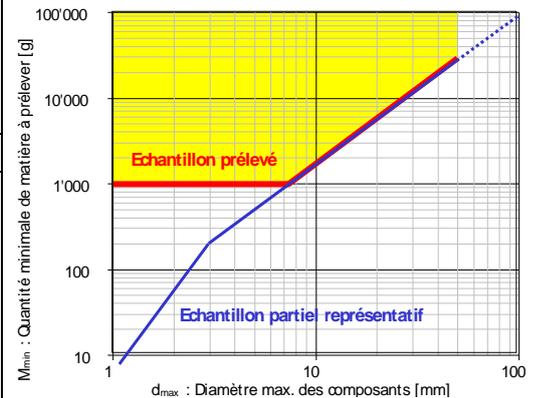
Annexe 8b: Protocole de prélèvement de matière solide

Investigation:	
• N° de mandat:	
• Description:	
N° d'échantillon:	Date, heure:

Type d'échantillon	<input type="checkbox"/> Echantillon unique <input type="checkbox"/> Echantillon composite	Description / schéma de l'emplacement:
Point de prélèvement	<input type="checkbox"/> GPS • Désignation: • Coordonnées: Profondeur/pt réf.: de à [cm]	

Echantillon	<input type="checkbox"/> saturé <input type="checkbox"/> très humide <input type="checkbox"/> moyennement humide <input type="checkbox"/> peu humide <input type="checkbox"/> sec	
• Description (USCS):	.....	• Matériaux allogènes visibles:
• Granulométrie:	de à [cm]	• Fractions triées (description, poids [kg]):
• Poids de l'échant. prélevé:	..... [kg]	
Prélèvement, transport:		
• Contenant de l'échantillon:	.....
• Type de transport:	.....

Autres caractéristiques du sol (si nécessaire)	
• pH:	.....
• Teneur en humus [%]:	.....
• Teneur en argile [%]:	.....



Analyses à effectuer	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Laboratoire:	.....
Livraison:	.....
• Date, heure:	.....

Auteur du prélèvement	
• Nom:	.....
• Date, visa:	.....

Annexe 9

Note d'information - Mesures visant à diminuer les sources d'erreur lors du prélèvement et de l'analyse d'échantillons de matière solide contenant des HCC

(Version novembre 2015)

L'investigation des sites pollués pour y rechercher des substances volatiles comme les hydrocarbures chlorés (HCC) présente de grandes difficultés. Les manipulations des échantillons lors du prélèvement, du transport, et de l'analyse peuvent occasionner des pertes de substance qui affecteront les résultats.

Lorsqu'on applique les aides techniques actuellement disponibles, on doit toujours s'attendre à ce que l'analyse de substances volatiles dans la matière solide soit affectée d'une incertitude relativement grande imputable au prélèvement des échantillons, à leur préparation et à l'inhomogénéité du matériel étudié.

Les opérateurs sur le terrain et en laboratoire peuvent contribuer à éviter les sources d'erreur éventuelles et à limiter les incertitudes en respectant certaines règles de base.

La présente note d'information expose les points critiques du prélèvement et de l'analyse et propose des mesures de nature à réduire les incertitudes.

Note élaborée sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) par l'entreprise Bachema.

Conseiller / opérateur des prélèvements		
Actions	Points critiques / Problèmes	Mesures
Prélèvement dans un forage ou un sondage par carottier battu	L'interface entre l'échantillon et la sonde ou le carottier peut être fortement échauffée par frottement mécanique lors du forage ou du battage.	Introduire uniquement le cœur du matériel foré dans le récipient destiné à l'échantillon et ne soumettre que celui-ci à l'analyse
Prélèvement dans une tranchée ouverte à la pelle mécanique	L'échantillon doit être prélevé dans une paroi de la tranchée (et non pas dans le matériel excavé), en respectant les mesures de sécurité requises.	Autre solution : prélèvement dans le godet de la pelle mécanique, en évitant que l'échantillon ne reste longtemps en contact avec l'air ambiant. Ces techniques de prélèvement s'appliquent plutôt à l'échantillonnage d'un « hot spot » ; elles ne fournissent pas forcément des échantillons représentatifs d'une grande surface.
Quantité minimale prélevée	L'échantillon doit être représentatif du matériel à étudier. Il faut donc en prélever et en analyser une quantité suffisante. La quantité minimale à prélever par rapport à la taille maximale des composants est décrite dans l'aide à l'exécution de l'OFEV intitulée « Méthodes d'analyse dans le domaine des déchets et des sites pollués » [1]. Cette exigence n'est généralement pas applicable en présence de substances volatiles, car l'échantillon sera homogénéisé (par	Autre solution pour diminuer la quantité prélevée : échantillonner la fraction fine. En estimant la part de la fraction grossière, il est possible de déterminer ensuite la teneur totale par extrapolation – lorsqu'il n'y a aucune indication de pollution de la fraction grossière

Conseiller / opérateur des prélèvements		
Actions	Points critiques / Problèmes	Mesures
	<p>traitement mécanique) puis ramené à la taille d'un échantillon partiel représentatif au laboratoire, ce qui peut provoquer une perte importante de substances volatiles.</p> <p>Bei flüchtigen Stoffen ist diese Vorgabe meist nicht umsetzbar, da die Probe anschliessend im Labor (durch mechanische Behandlung) homogenisiert und auf eine repräsentative Teilprobe reduziert werden muss, was zu einem erheblichen Verlust an flüchtigen Stoffen führen kann.</p>	
Assurance qualité lors de l'échantillonnage et du transport Protocole	Difficultés lors de l'interprétation ou de la vérification des valeurs mesurées.	<p>Toutes les observations faites lors du prélèvement (y compris la description de la matrice de l'échantillon, des conditions météorologiques, des particularités organoleptiques rencontrées, du récipient destiné à l'échantillon, etc.) sont importantes pour l'interprétation future des résultats.</p> <p>Le prélèvement de chaque échantillon doit être consigné en détail.</p> <p>De plus:</p> <ul style="list-style-type: none"> • établir des listes de contrôle; • former / instruire les opérateurs des prélèvements ; • communiquer avec le laboratoire (p. ex. convenir de la livraison des échantillons) ; • choisir un laboratoire approprié, satisfaisant aux critères suivants : • le laboratoire est accrédité selon la norme SN EN ISO/IEC 17025, • la méthode d'analyse mise en œuvre est couverte par l'accréditation (on trouvera les entités accréditées avec le champ d'application de l'accréditation à l'adresse http://www.seco.admin.ch/sas/)
Prise en compte de la nature du sous-sol / différents types de matrice	Les matériaux à haute teneur en carbone organique (p. ex. contenant beaucoup d'humus) adsorbent (lient) mieux les substances organiques. Les matériaux à faible teneur en carbone organique (p. ex. gravier) adsorbent peu les substances organiques. Des pertes de substance risquent donc de se produire rapidement lors du prélèvement de matériaux graveleux.	Les échantillons doivent être introduits dans des récipients à verrouillage étanche aussitôt après leur prélèvement, puis ils seront entreposés au froid (4°C) jusqu'à l'analyse.
Échantillonnage dans la zone insaturée et dans la zone saturée	Le sous-sol insaturé ou saturé est généralement un système à trois phases – matière solide, eau interstitielle et air interstitiel. Dans la zone insaturée, les polluants sont souvent répartis à l'équilibre entre ces trois phases.	Lors de l'analyse en laboratoire, on détermine la quantité totale de la substance étudiée qui est présente dans l'échantillon, puis on estime sa teneur dans la fraction solide, rapportée au poids sec de l'échantillon. On ne distingue pas si la substance étudiée est liée à la matière

Conseiller / opérateur des prélèvements		
Actions	Points critiques / Problèmes	Mesures
	Dans la zone saturée, il est possible que l'équilibre ne soit pas (encore) établi, selon la dynamique locale.	solide (adsorbée) ou dissoute dans l'eau interstitielle.
Éviter les pertes de substance lors du transport	L'échantillon ne doit pas être altéré entre le prélèvement et l'analyse en laboratoire. Il faut en particulier veiller à ce qu'il n'y ait aucune perte de substance volatile par dégazage.	<p>Les mesures suivantes seront prises pour éviter ou pour limiter au maximum le dégazage:</p> <ul style="list-style-type: none"> • introduire l'échantillon dans un récipient à verrouillage étanche (généralement en verre) ; • éviter autant que possible la présence d'air ambiant ; remplir le récipient à ras bord ; • refroidir immédiatement l'échantillon à une température de 4° C ; • veiller à ce que la chaîne du froid soit ininterrompue du prélèvement à la livraison au laboratoire ; • transporter le plus vite possible l'échantillon refroidi au laboratoire. <p>Autre solution :</p> <ul style="list-style-type: none"> • recouvrir l'échantillon d'une couche de solvant organique (généralement du méthanol) aussitôt après le prélèvement ; • transporter le mélange refroidi échantillon/solvant au laboratoire. <p>Il est important que celui qui étudie le site pollué et celui qui procède au prélèvement collaborent étroitement (surtout lorsque l'échantillon est recouvert de solvant sur site)</p>

Laboratoire		
Aktions	Points critiques / Problèmes	Mesures
Préparation des échantillons	La préparation des échantillons (pour obtenir des échantillons de laboratoire homogènes et représentatifs) est affectée d'une incertitude relativement grande. Préparation des échantillons : les échantillons sont difficiles à homogénéiser, car leur traitement mécanique peut occasionner des pertes de substance d'ampleur inconnue.	Homogénéiser les échantillons à la main au laboratoire, à la température la plus basse possible sans les congeler. Il est possible, au laboratoire, de séparer les éventuels matériaux grossiers de la fraction fine, de les concasser sommairement, puis de les remélanger à la fraction fine. Ne pas broyer finement les échantillons au laboratoire ! La quantité soumise à l'analyse doit être la plus grande possible. On peut ainsi appréhender une part représentative du matériel échantillonné. En admettant que les polluants sont adsorbés à la surface de la matrice, on peut n'échantillonner et analyser que la fraction fine. Puis on estime les teneurs en polluants dans l'ensemble de la matrice après avoir établi la distribution granulométrique (voir ci-dessus « Quantité minimale prélevée »).

Laboratoire		
Aktions	Points critiques / Problèmes	Mesures
Validation de la méthode d'analyse	<p>Les polluants doivent être identifiés et quantifiés sans ambiguïté au moyen d'une méthode d'analyse appropriée. Chaque méthode d'analyse doit être validée. Les données relatives à la validation indiquent si la méthode en question est appropriée pour étudier la question posée. Mais les substances volatiles posent les problèmes suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • difficulté de valider l'ensemble du procédé (y compris la préparation et l'extraction), car il n'existe aucun matériel de référence (la méthode d'analyse peut être vérifiée avec des échantillons aqueux ; l'ensemble du procédé, y compris la préparation des échantillons, se base sur ces analyses) ; • il existe peu d'essais interlaboratoires ; • il y a peu de possibilités de comparaison avec d'autres laboratoires, car il n'existe aucun échantillon de référence homogène. <p>Conclusion : l'analyse en laboratoire est affectée d'une incertitude relativement grande, car une bonne partie du procédé (l'homogénéisation) est étroitement liée à la nature des échantillons et ne peut donc pas être suffisamment validée.</p>	<p>Les analyses en laboratoire se conformeront à l'aide à l'exécution de l'OFEV intitulée « Méthodes d'analyse dans le domaine des déchets et des sites pollués »¹ pour garantir l'obtention de résultats représentatifs, reproductibles et comparables. Le laboratoire mandaté doit être accrédité selon la norme SN EN ISO/IEC 17025 et la méthode d'analyse appliquée doit entrer dans le champ d'application de l'accréditation</p>
Assurance qualité dans les tâches de routine	<p>Il faut s'assurer que la méthode d'analyse mise en œuvre satisfasse à tous les critères de validation au moment des mesures et qu'elle soit adaptée à l'échantillon étudié.</p>	<p>Les procédures appliquées dans le laboratoire doivent être vérifiées régulièrement. Des échantillons de contrôle, des échantillons de référence et des échantillons à blanc seront également analysés.</p>