

> Air interstitiel – Prélèvement d'échantillons et analyse

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



> Air interstitiel – Prélèvement d'échantillons et analyse

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

Valeur juridique

La présente publication est une aide à l'exécution élaborée par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) en tant qu'autorité de surveillance. Destinée en premier lieu aux autorités d'exécution, elle concrétise des notions juridiques indéterminées provenant de lois et d'ordonnances et favorise ainsi une application uniforme de la législation. Si les autorités d'exécution en tiennent compte, elles peuvent partir du principe que leurs décisions seront conformes au droit fédéral. D'autres solutions sont aussi licites dans la mesure où elles sont conformes au droit en vigueur. Les aides à l'exécution de l'OFEV (appelées jusqu'à présent aussi directives, instructions, recommandations, manuels, aides pratiques) paraissent dans la collection «L'environnement pratique».

Impressum

Editeur

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

Auteurs

Jürgen Abrecht, GEOTEST AG, Zollikofen; Eckard Drewes, UmweltMess GmbH, Lützelflüh; Peter Steffen, SJ GeoTec AG, Wolfwil; Jörg Meyer, NIUTECH AG, Winterthur

Accompagnement à l'OFEV

Bernhard Hammer, division Déchets et matières premières; Christiane Wermeille et Monika Schwab-Wyssler, division Sols et biotechnologie

Référence bibliographique

OFEV (éd.) 2015: Air interstitiel – Prélèvement d'échantillons et analyse. Un module de l'aide à l'exécution «Investigation de sites pollués». Office fédéral de l'environnement, Berne. L'environnement pratique n° 1521): 43 p.

Traduction

André Carruzzo, Genève

Graphisme, mise en page

Karin Nöthiger, Niederrohrdorf

Photo de couverture

OFEV

Téléchargement au format PDF

www.bafu.admin.ch/uv-1521-f

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

Cette publication est également disponible en allemand et en italien.

© OFEV 2015

> Table des matières

Abstracts	5	7	Interprétation des résultats	31
Avant-propos	7	7.1	Généralités	31
Résumé	8	7.2	Facteurs influençant les concentrations de l'air interstitiel	31
<hr/>		7.3	Teneurs de fond naturelles en substances volatiles	32
1 Introduction	9	7.3.1	Hydrocarbures chlorés	32
<hr/>		7.3.2	Dioxyde de carbone, méthane et hydrogène sulfuré	33
2 Bases légales	10	7.4	Evaluation selon la législation sur les sites contaminés	33
<hr/>		7.5	Estimation calculée de la teneur en polluants de l'eau de percolation et de la teneur totale en polluants à partir des concentrations de gaz dans l'air interstitiel	33
3 Domaines d'application et substances	12	7.6	Assurance de la qualité	35
3.1	Sites de stockage définitif	12	<hr/>	
3.2	Aires d'exploitation	13	Annexes	36
3.3	Lieux d'accident	14	A1	Propriétés physico-chimiques de substances volatiles pouvant se trouver dans des sites pollués
3.4	Analyses de l'air ambiant	14	A2	Volumes relevés lors du prélèvement des échantillons
<hr/>			A3	Documentation de l'échantillonnage
4 Détermination des points de prélèvement	15		A4	Comparaison des méthodes
4.1	Sites de stockage définitif	15	<hr/>	
4.2	Aires d'exploitation	16	Bibliographie	42
4.3	Projets de construction	19	Répertoire	43
<hr/>				
5 Prélèvement des échantillons	20			
5.1	Méthode passive	20		
5.2	Méthodes actives	20		
	5.2.1 Prélèvement des échantillons à l'aide de sondes creuses	21		
	5.2.2 Prélèvement avec un packer	24		
	5.2.3 Membrane Interface Probe (MIP)	26		
5.3	Volume relevé par l'échantillonnage	26		
5.4	Assurance de la qualité	27		
<hr/>				
6 Analyse	28			
6.1	Généralités	28		
6.2	Méthodes d'analyse	28		
	6.2.1 Analyse selon la méthode directe	29		
	6.2.2 Analyse selon la méthode par enrichissement	29		
6.3	Assurance de la qualité	30		

> Abstracts

The “Sampling and Analysis of Pore Air” module described in the “Examination of polluted Sites” enforcement aid, provides information about the areas of application of pore air measurement and includes instructions for selecting sampling sites. It also describes the sampling methodology and the analysis of pore air studies of contaminated sites. The module reflects the current status of technology, and the report also addresses the evaluation of the findings, as well as the aspect of quality assurance.

Keywords:
Pore air,
Polluted sites,
Contaminated site

Das Modul Probenahme und Analyse von Porenluft der Vollzugshilfe Untersuchung von belasteten Standorten gibt Auskunft über die Einsatzbereiche von Porenluftmessungen und enthält Anleitungen für die Festlegung der Probenahmestellen. Darüber hinaus werden die Probenahmetechnik und die Analytik von Porenluftuntersuchungen im Bereich der Altlasten beschrieben. Dabei gibt das Modul den heutigen Stand der Technik wieder. Zum Schluss wird auf die Auswertung der Resultate und die Qualitätssicherung eingegangen.

Stichwörter:
Porenluft,
Belastete Standorte,
Altlast

Le module Air interstitiel – Prélèvement d'échantillons et analyse qui fait partie de l'aide à l'exécution Investigation de sites pollués fournit des informations sur le domaine d'application des mesures d'air interstitiel et sur le choix des points de prélèvement. Il décrit également les techniques d'échantillonnage et les méthodes d'analyse de l'air interstitiel dans le domaine des sites contaminés, et reflète l'état actuel de la technique. La dernière partie est consacrée à l'interprétation des résultats et à l'assurance de la qualité.

Mots-clés:
air interstitiel,
sites pollués,
sites contaminé

Il modulo Prelievo di campioni e analisi dell'aria interstiziale dell'aiuto all'esecuzione Indagine sui siti inquinati fornisce indicazioni sui campi d'applicazione delle misurazioni dell'aria contenuta nei pori del suolo e istruzioni per scegliere i punti di prelievo. Descrive inoltre la tecnica di campionamento e i metodi di analisi dell'aria interstiziale nell'ambito dei siti inquinati, riflettendo lo stato attuale della tecnica. Il modulo si sofferma infine sull'interpretazione dei risultati e sulla garanzia della qualità.

Parole chiave:
aria interstiziale,
siti inquinati,
siti contaminati

> Avant-propos

Parmi les polluants émis par les sites pollués, il n'est pas rare de trouver des substances volatiles qui aboutissent très facilement dans la phase gazeuse du sol. Si des voies de diffusion adéquates sont présentes, les polluants de l'air interstitiel peuvent atteindre des endroits où se trouvent des personnes et les mettre potentiellement en danger.

C'est pourquoi les analyses de l'air interstitiel jouent un rôle important dans les investigations et l'évaluation des sites pollués. Elles permettent ainsi de remplir l'un des objectifs de l'ordonnance sur les sites contaminés (OSites), qui est l'évaluation d'un site pollué du point de vue de la protection des personnes contre la pollution atmosphérique.

Avec ses prescriptions concernant les points de prélèvement, l'échantillonnage et les méthodes d'analyse de l'air interstitiel, la présente aide à l'exécution entend contribuer à l'harmonisation, à l'assurance de la qualité et à l'égalité juridique. L'utilisation de méthodes de prélèvement et d'analyse correspondant à l'état actuel de la technique est en outre une condition pour pouvoir obtenir des indemnités au sens de l'ordonnance relative à la taxe pour l'assainissement des sites contaminés (OTAS).

Gérard Poffet
Sous-directeur
Office fédéral de l'environnement (OFEV)

> Résumé

Selon l'ordonnance sur les sites contaminés (OSites), un site pollué nécessite un assainissement du point de vue de la protection des personnes contre la pollution atmosphérique si l'air interstitiel dépasse la valeur de concentration fixée et si les émissions dégagées par le site atteignent des endroits dans lesquels des personnes peuvent se trouver régulièrement pendant un certain temps.

Pour pouvoir analyser et évaluer la pollution atmosphérique engendrée par un site pollué, il faut donc procéder à des mesures de l'air interstitiel. Les résultats obtenus devraient en outre être vérifiés dans la mesure du possible par d'autres méthodes d'investigation quantitatives ainsi que par un contrôle de plausibilité (p. ex. investigation historique, hydrogéologie, géologie).

Les mesures de l'air interstitiel sont utilisées pour les substances à volatilité moyenne à légère, ne dépassant pas le point d'ébullition de 200° C. Le prélèvement d'échantillons d'air interstitiel présuppose un minimum de perméabilité du sous-sol. Condition normalement remplie par les couches d'une granulométrie allant de gravier jusqu'à sable fin dans la zone non saturée.

Dans les décharges, il est recommandé d'opter pour un échantillonnage par quadrillage régulier, tout en tenant compte des voies de diffusion potentielles (p. ex. tranchées de canalisation). Les analyses d'air interstitiel servent notamment à obtenir des indications sur l'état de dégradation de la décharge. Dans les aires d'exploitation, l'accent est mis sur la détection directe de pollutions par des solvants volatils ou des substances utilisées par l'entreprise. Ici les points de prélèvement seront plutôt choisis de façon ponctuelle, en fonction des résultats de l'investigation historique (p. ex. entreposage, transvasement, infiltration, air évacué, eaux usées).

Une distinction est faite entre méthode de prélèvement active et passive. La méthode passive ne livre que des informations qualitatives, et l'utilisation de collecteurs passifs ne s'est pas imposée. Dans la méthode de prélèvement active, les échantillons d'air interstitiel sont prélevés par aspiration soit au moyen d'une sonde creuse, soit avec un packer (combiné avec des carottages). Ici aussi, on fait une distinction entre méthode directe et procédé par enrichissement. Dans le premier cas, l'échantillon est directement prélevé dans un flacon headspace, une ampoule ou un sachet de gaz. Dans le second cas, l'air interstitiel s'écoule dans un tube d'adsorption. Les analyses sont en général effectuées avec un chromatographe en phase gazeuse.

L'interprétation des valeurs de l'air interstitiel doit tenir compte de divers facteurs tels que les conditions climatiques, l'imperméabilisation des surfaces, la géologie, la lithologie et le bruit de fond naturel.

Pour l'assurance de la qualité, il est important que le prélèvement des échantillons soit planifié et réalisé dans les règles de l'art et documenté de manière claire et compréhensible. Pour les laboratoires effectuant des analyses d'air interstitiel, une accréditation selon la norme ISO/IEC 17025 est recommandée.

1 > Introduction

L'étude de l'air interstitiel est une méthode importante couramment utilisée pour localiser la présence de polluants volatils dans le sous-sol.

Pour obtenir des résultats pertinents, il est essentiel de bien connaître la constitution du sous-sol et l'historique du site. La stratégie de sondage doit être adaptée aux conditions locales.

Au cours de l'évaluation d'un site pollué au sens de la législation sur les sites contaminés, les résultats des études de l'air interstitiel doivent si possible être vérifiés par d'autres méthodes d'investigation quantitatives. Une évaluation du site basée uniquement sur l'air interstitiel n'est envisageable qu'à titre exceptionnel, s'il n'est pas possible de prélever des échantillons d'eau souterraine ou d'eau de percolation. Dans tous les cas, il est nécessaire de procéder à des contrôles de plausibilité en tenant compte de l'investigation historique ainsi que de la géologie et de l'hydrogéologie du site.

La présente aide à l'exécution a pour but de:

- > montrer dans quelles conditions les analyses de l'air interstitiel peuvent être utilisées de manière pertinente et ciblée (possibilités et limites);
- > donner un bref aperçu des techniques d'échantillonnage et d'analyse de l'air interstitiel;
- > définir des normes pour la réalisation d'études de l'air interstitiel;
- > fixer les exigences minimales concernant la documentation des échantillonnages et des analyses.

Elle s'adresse par conséquent:

- > aux laboratoires effectuant des prélèvements et des analyses d'air interstitiel avec leurs propres appareils;
- > aux bureaux d'experts mandatés pour mener des investigations sur des sites pollués et qui confient à des laboratoires les analyses d'air interstitiel;
- > aux autorités spécialisées qui se basent sur les résultats d'analyse de l'air interstitiel pour évaluer des pollutions et exiger au besoin des mesures supplémentaires.

2 > Bases légales

Conformément à l'art. 32c, al. 1, de la loi fédérale du 7 octobre 1983 sur la protection de l'environnement (LPE; RS 814.01), les cantons veillent à ce que soient assainis les décharges contrôlées et les autres sites pollués par des déchets, lorsqu'ils engendrent des atteintes nuisibles ou incommodantes ou qu'il existe un danger concret que de telles atteintes apparaissent. Les dispositions de cet article sont explicitées dans l'ordonnance du 26 août 1998 sur l'assainissement des sites pollués (ordonnance sur les sites contaminés, OSites; RS 814.680).

En vertu de l'art. 11 OSites, un site pollué nécessite un assainissement du point de vue de la protection des personnes contre la pollution atmosphérique, si l'air interstitiel dépasse la valeur de concentration mentionnée à l'annexe 2, et si les émissions dégagées par le site atteignent des endroits dans lesquels des personnes peuvent se trouver régulièrement pendant un certain temps.

Si le site dégage des émissions pour lesquelles il n'existe pas de valeur de concentration, comme des odeurs ou de la poussière, il nécessite un assainissement lorsque les émissions risquent de devenir des immissions excessives au sens de l'ordonnance du 16 décembre 1985 sur la protection de l'air (OPair; RS 814.318.142.1) (annexe 2, al. 1, OSites).

Conformément à l'annexe 2, al. 2, OSites, le prélèvement d'échantillons et l'analyse de l'air interstitiel sont soumis aux exigences suivantes:

- a) le prélèvement d'échantillons doit se faire au moyen de sondes pour gaz du sol, à un nombre d'endroits représentatif de la pollution du site, en veillant à ne pas aspirer d'air environnant lors du prélèvement des échantillons;
- b) il suffit d'analyser, dans l'air interstitiel, les substances dont la présence sur le site est probable d'après l'investigation historique. Si l'on analyse uniquement des paramètres totaux, le critère d'évaluation valable sera toujours la valeur de concentration la plus basse des différentes substances.

Il est possible de renoncer au prélèvement d'air interstitiel si l'on dispose d'une autre preuve que les valeurs de concentration dans l'air interstitiel ne peuvent pas être dépassées, notamment si l'on connaît exactement la composition et la provenance des matériaux présents sur le site (annexe 2, al. 3, OSites).

Les valeurs de concentration pour l'air interstitiel indiquées dans l'annexe 2 de l'OSites ne peuvent servir à évaluer la nécessité d'assainir au sens de la législation sur les sites contaminés que s'il est **également démontré** que l'air interstitiel pollué atteint des endroits «dans lesquels des personnes peuvent se trouver régulièrement pendant un certain temps» (art. 11 OSites).

Pour évaluer les atteintes causées par des substances volatiles, on considère l'eau de percolation comme lixiviât; s'il n'est pas possible de prélever des échantillons de l'eau de percolation, la concentration de cette dernière est calculée à partir des mesures de la concentration de l'air interstitiel (cf. annexe 1, al. 4, OSites).

L'Office fédéral de l'environnement édicte des directives en ce sens sur le prélèvement d'échantillons et l'analyse de l'air interstitiel ainsi que sur l'évaluation des atteintes par des substances volatiles (cf. annexe 1, al. 6, et annexe 2, al. 4, OSites).

3 > Domaines d'application et substances

Les analyses de l'air interstitiel sont aujourd'hui couramment utilisées pour déterminer les contaminations par des substances gazeuses au cours d'investigations sur des sites pollués. Il s'agit de méthodes indicatives qui permettent d'obtenir très rapidement et à relativement peu de frais des informations sur la nature de la contamination et son étendue. Bien que les résultats d'analyse fournissent généralement des données très précises sur les concentrations, ils ne peuvent être utilisés que dans certaines limites pour l'évaluation contraignante d'un site selon le droit sur les sites contaminés. Les raisons sont précisées ci-après.

Une méthode indicative
relativement peu coûteuse

Les mesures de l'air interstitiel peuvent être utilisées à différentes fins et avec différents objectifs. Le sous-sol à étudier doit présenter une perméabilité minimale pour permettre le prélèvement des échantillons. En principe, les couches de gravier jusqu'à sable fin dans la zone non saturée remplissent ces conditions. Par contre, les horizons limoneux à argileux ou les couches de tourbe très humides ne sont pas assez perméables. Lorsque le prélèvement d'échantillons d'air interstitiel est impossible, il est recommandé de prélever et analyser des échantillons solides.

En général, les études de l'air interstitiel sont utilisées au cours de l'investigation préalable. Mais elles peuvent aussi être appliquées dans le cadre d'investigations de détail ou du suivi d'assainissements dans la zone non saturée.

Les mesures de l'air interstitiel sont utilisées pour les substances à volatilité faible ou moyenne, dont le point d'ébullition ne dépasse pas 200° C. Suivant la méthode d'analyse, elles permettent de déterminer divers groupes de substances avec différents seuils de quantification.

La nature des polluants et les biens à protéger varient en fonction du site (site de stockage définitif, aire d'exploitation, etc.), tout comme les questions étudiées et les objectifs des mesures d'air interstitiel.

3.1 Sites de stockage définitif

Les mesures de l'air interstitiel sont une méthode standardisée pour mener des investigations dans des décharges mixtes et communales, mais aussi dans d'autres décharges où il y a au moins suspicion d'entreposage de matériaux organiques ou de substances organiques volatiles. Elles servent d'une part à démontrer la présence des gaz typiques des décharges et d'autre part à rechercher des substances organiques volatiles stockées (p. ex. solvants).

Sites de stockage définitif:
principalement gaz de décharge

Les deux plus importants gaz de décharge sont le méthane (gaz combustible), qui peut atteindre des concentrations de près de 100 %, et le dioxyde de carbone. Il s'agit de produits typiques des processus de biodégradation dans des sites de stockage définitifs comportant des fractions organiques. D'autres gaz peuvent être générés par les décharges. L'hydrogène sulfuré par exemple se forme en présence de déchets urbains et de gypse. Le monoxyde de carbone est produit par des feux couvants dans le corps de la décharge. Contrairement aux substances organiques volatiles entreposées comme déchets en décharge, ces gaz, de même que l'hydrogène et l'ammoniac, sont générés sur place sous l'effet de réactions dépendant en grande partie des conditions physico-chimiques. Leur présence permet ainsi de tirer des conclusions sur l'état de dégradation de la décharge. Très souvent, la nature et la proportion des gaz de décharge fournissent des indications importantes sur les substances entreposées et sur l'état de dégradation des fractions organiques.

Les gaz de décharge peuvent mettre en danger la santé des personnes et des animaux soit directement en raison de leur toxicité par inhalation (p. ex. monoxyde de carbone et hydrogène sulfuré), soit indirectement dans le cas des gaz combustibles ou explosifs (comme le méthane).

Il s'ensuit que les gaz de décharge ne présentent un risque que s'ils atteignent des endroits où des personnes ou des animaux peuvent se trouver (p. ex. caves, canalisations, fossés) et que le volume de gaz est important.

3.2 Aires d'exploitation

Les investigations menées dans les aires d'exploitation visent généralement à montrer la présence de pollutions par des solvants volatils et/ou des substances utilisées par l'entreprise (essence, pétrole, diesel, huile de chauffage).

Pour les investigations techniques portant sur des stations-services ou des dépôts de carburants, on utilise la méthode de mesure des composants d'huile minérale des carburants (composés aliphatiques, aromatiques, MTBE).

La présence de substances organiques volatiles est déjà en soi un important indicateur de pollutions potentielles par des hydrocarbures. En général, les volumes de gaz sont faibles, mais des concentrations élevées (le plus souvent de l'ordre du ppm) sont le signe d'une pollution qui, contrairement aux gaz de décharge, touche aussi bien les matières solides que l'eau souterraine. La concentration de gaz est dans ce cas un indicateur direct du danger potentiel.

Les mesures complémentaires effectuées lors des investigations de détail servent souvent à délimiter le plus précisément possible les zones polluées et les foyers de pollution.

Aires d'exploitation:
principalement des solvants
volatils et des substances
utilisées par l'entreprise

3.3 Lieux d'accident

En cas d'accident ou d'avarie ayant provoqué des fuites de substances volatiles (HCC, essence, diesel, huile de chauffage), les mesures de l'air interstitiel peuvent fournir des indications sur la dispersion de ces substances dans le sous-sol.

3.4 Analyses de l'air ambiant

Les valeurs de concentration pour l'air interstitiel indiquées à l'annexe 2 de l'OSites ne peuvent servir à évaluer le besoin d'assainir au sens de la législation sur les sites contaminés que s'il est démontré parallèlement que l'air du sol pollué atteint des endroits «dans lesquels des personnes peuvent se trouver régulièrement pendant un certain temps». Si l'air interstitiel accuse des concentrations élevées dépassant les valeurs de l'OSites et qu'une émission dans ce type d'endroit ne peut être exclue compte tenu des caractéristiques locales de la géologie et du bâti, des mesures de l'air ambiant sont recommandées, voire nécessaires, aussi bien pour évaluer le besoin d'assainir que pour déterminer le risque direct auquel sont exposées les personnes qui s'y trouvent. Outre les locaux fermés (p.ex. caves), il faut aussi tenir compte des espaces partiellement ouverts, comme les tranchées de canalisations et les fouilles (cf. 4.3).

Présence régulière de personnes pendant un certain temps

Les mesures de contrôle des gaz combustibles (principalement le méthane), du monoxyde de carbone, du dioxyde de carbone et de l'hydrogène sulfuré peuvent dans ces cas être effectuées sur place au moyen d'appareils portables.

Mesures de contrôle des gaz

Les méthodes d'échantillonnage et d'analyse de l'air interstitiel ne conviennent pas aux mesures de l'air ambiant. Il existe pour ces dernières des méthodes spécifiques, basées sur des directives et des normes de l'OFSP et de la SUVA. Ces mesures sont réalisées par des entreprises spécialisées.

4 > Détermination des points de prélèvement

En général, la nature des polluants et les biens à protéger de même que les questions étudiées et les objectifs des mesures d'air interstitiel varient selon qu'il s'agit d'un site de stockage définitif ou d'une aire d'exploitation, et nécessitent une stratégie d'échantillonnage adéquate.

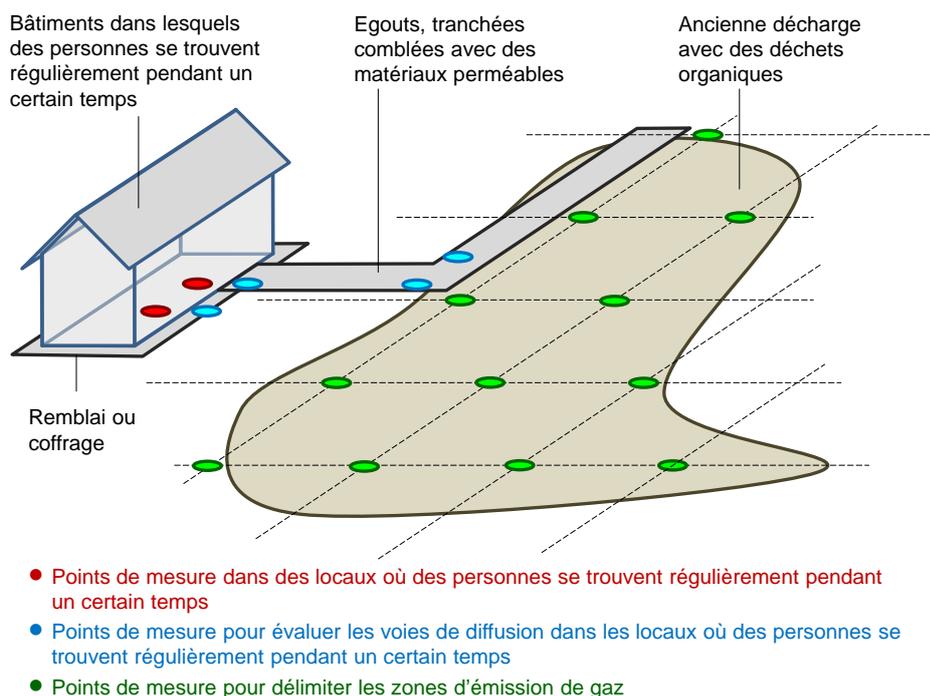
Stratégie d'échantillonnage

4.1 Sites de stockage définitif

Si des mesures de l'air interstitiel sont nécessaires et judicieuses pour les raisons indiquées ci-dessus, une stratégie d'échantillonnage doit être établie en fonction des questions étudiées. Si des bâtiments existants ou en projet sont potentiellement menacés, des mesures devront aussi être effectuées le cas échéant hors du périmètre de la décharge.

Dans le cas d'anciennes décharges, la nature et la localisation des matériaux entreposés ne sont généralement pas connus. Il est donc recommandé d'établir un quadrillage sur la surface supposée de la décharge en indiquant les points de prélèvement de gaz (fig. 1, points verts). Des points de mesure supplémentaires seront définis dans le cadre de la protection des personnes (fig. 1, points bleus et rouges).

Fig. 1 > Quadrillage pour le prélèvement d'échantillons dans une décharge



Les relevés doivent couvrir si possible l'ensemble de l'aire examinée. Il est souvent judicieux de procéder par étapes, avec une première série de mesures dont les résultats servent ensuite à affiner le quadrillage dans des secteurs sélectionnés. La distance entre les points de mesure dépend de la situation locale et des objectifs visés. Cette méthode permet, selon la trame, de délimiter au moins approximativement les zones produisant beaucoup de gaz de décharge.

Procédure par étapes

Si des concentrations élevées de gaz sont mesurées et que des zones très polluées peuvent être délimitées, des essais de pompage peuvent se révéler utiles en vue des mesures contre les infiltrations de gaz dans les bâtiments. Ces essais fournissent ainsi des indications sur les volumes de gaz attendus et sur les mesures à prendre.

La technique couramment pratiquée autrefois, c'est-à-dire effectuer des mesures sur l'ensemble de la décharge au moyen de «sondes tapis» pour détecter des émissions de gaz à la surface du sol, s'est révélée peu fiable. Les résultats sont en effet fortement tributaires des conditions extérieures, et une dilution avec l'air atmosphérique est pratiquement inévitable. Le recours à cette méthode est donc problématique. Dans les régions agricoles, l'observation de la végétation (troubles de croissance) peut fournir des indications plus fiables sur d'éventuelles fuites de gaz.

4.2

Aires d'exploitation

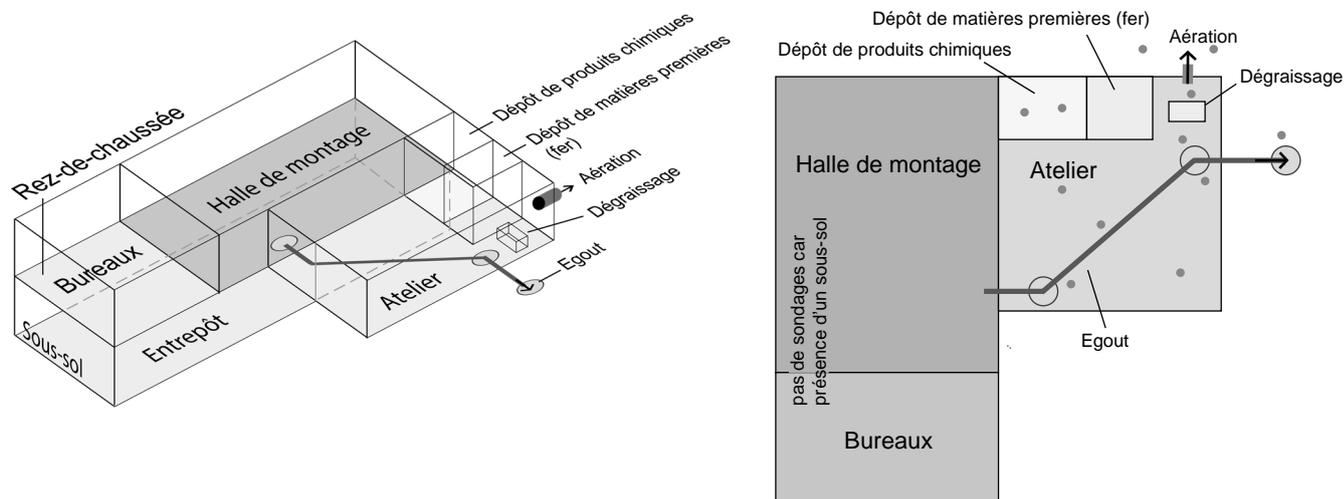
Les mesures de substances organiques volatiles toxiques servent principalement à la détection qualitative et à la délimitation spatiale d'une contamination. C'est pourquoi la stratégie d'échantillonnage doit se baser sur les résultats de l'investigation historique. Les prélèvements se concentreront dans les zones où il est avéré ou suspecté que des substances de ce genre ont été stockées, utilisées, transvasées ou se sont infiltrées^[5].

Détection qualitative,
délimitation spatiale

Dans un premier temps, il y a lieu d'examiner de façon précise et exhaustive l'emplacement des conduites industrielles. Il n'existe souvent plus de plan actualisé des aires industrielles ou des stations-services. Si les conduites ne peuvent pas être localisées avec certitude, il faut procéder à un sondage à un autre endroit ou effectuer des excavations manuelles pour les localiser.

Conduites industrielles

Fig. 2 > Stratégie d'échantillonnage pour une aire d'exploitation



Ainsi, la procédure est déterminée *en fonction du site et de l'événement*. Certaines substances (en particulier les solvants halogénés) ont été utilisées surtout dans des sites industriels et artisanaux et de façon ponctuelle. Les prélèvements systématiques par quadrillage sur l'ensemble de la surface sont donc généralement inappropriés et souvent irréalisables. En outre, les possibilités d'échantillonnage sont souvent limitées, en particulier dans les aires d'exploitation encore en activité. Il faut donc avant tout chercher à étudier si possible toutes les zones potentiellement polluées avec une densité d'échantillonnage suffisante. Compte tenu des propriétés et caractéristiques de diffusion spécifiques des substances organiques volatiles, il faut veiller à fixer les points de prélèvement assez proches les uns des autres (5 à 10 m, voire moins).

Possibilités d'échantillonnage limitées

Les propriétés et caractéristiques de diffusion des polluants volatils peuvent être très variables (cf. annexe A1). Pour déterminer les points de mesure, il faut notamment tenir compte des paramètres suivants:

Propriétés des substances et caractéristiques de diffusion

- > mobilité des substances (tendance à la sorption),
- > tendance à suivre les voies de diffusion perméables (conduites, coffrages, etc.),
- > densité des gaz (direction de propagation préférentielle).

De nombreuses substances, comme les hydrocarbures halogénés, ont tendance à se concentrer dans ou au-dessus des horizons peu perméables, ce qui rend leur distribution dans le sous-sol très hétérogène et pratiquement impossible à prévoir.

Les procédures les mieux adaptées sont celles prévoyant:

- > un échantillonnage en plusieurs étapes avec réduction dans un deuxième temps des distances entre les points de mesure, ou
- > l'utilisation d'un laboratoire d'analyse mobile.

Le laboratoire mobile peut être utile en cas d'accident lorsque des résultats doivent être obtenus rapidement, ainsi que pour la recherche et la délimitation de foyers de pollution. Il permet de déterminer de manière ciblée les points de prélèvement en fonction des résultats de mesure. Cela permet d'éviter des campagnes de mesure supplémentaires, ce qui constitue aussi un avantage en termes de coûts. Le laboratoire mobile peut être remplacé par des mesures *in situ* au moyen d'un détecteur à photo-ionisation (PID), qui n'indique toutefois que la somme des composés organiques volatils.

Pour fixer la profondeur d'échantillonnage, il faut tenir compte des points suivants:

- > constitution du sous-sol (cohésif: peu perméable, sablonneux-graveleux: très perméable),
- > surface imperméabilisée ou non imperméabilisée,
- > profondeur des regards et des canalisations,
- > configuration du bâti,
- > emplacement de la nappe phréatique (si le niveau piézométrique est peu profond, faire attention lors des sondages dans les sous-sols).

Profondeur d'échantillonnage

Dans des conditions favorables (niveau piézométrique peu profond, zone non saturée suffisamment perméable), les mesures sur toute la surface selon un quadrillage déterminé peuvent servir à délimiter des panaches de polluants (p. ex. solvants halogénés) dans les eaux souterraines, car ces derniers rediffusent dans l'air interstitiel dans la zone en aval du foyer de pollution.

Délimitation de panaches de polluants

L'échantillonnage en profondeur permet d'obtenir des informations sur la distribution verticale des substances organiques volatiles (p. ex. lorsqu'on sait que le sous-sol présente une constitution hétérogène). Différentes possibilités sont envisageables:

Distribution verticale des polluants

- > Prélèvement d'échantillons de gaz à la profondeur voulue, puis enfoncement d'une autre sonde creuse en acier à proximité immédiate pour échantillonner une zone plus profonde. Les sondes à pointes perdues ne peuvent pas être enfoncées plus profondément après le premier prélèvement.
- > En cas de forages, prélèvement d'échantillons à la profondeur voulue dans la section non tubée (p. ex. après retrait du tube de protection). Le tube doit être isolé de l'air atmosphérique à la surface du sol au moyen d'un packer.
- > Aménagement d'emplacements de mesures multiples à différentes profondeurs et étanches les uns par rapport aux autres («cascades»).
- > Utilisation de sondes MIP (Membrane Interface Probe).

4.3 Projets de construction

Conformément à l'art. 3 OSites, les projets de construction sur des sites pollués sont en principe possibles à condition:

- > qu'aucune atteinte nuisible ou incommode ne soit engendrée,
- > que le site soit assaini en même temps, ou
- > que le projet n'entrave pas de manière considérable l'assainissement ultérieur du site.

Pour examiner si un projet de construction sur un site pollué peut, lors de sa réalisation ou ultérieurement, engendrer un besoin d'assainissement, il y a lieu de procéder à une estimation du risque. Celle-ci se fait en général dans le cadre d'une investigation menée lors de la phase de planification du projet. Les mesures de gaz doivent être effectuées à un stade précoce au cas où des mesures bâties préventives seraient nécessaires pour prévenir des risques liés à l'air interstitiel. Le spécialiste doit donc informer le maître d'ouvrage de manière ouverte et ciblée et être associé à la planification du projet.

Souvent les projets de construction sont liés à un changement d'affectation. Il peut ainsi arriver que des locaux dans lesquels des personnes se trouvent régulièrement pendant un certain temps soient construits sur des terrains non bâtis ou qui servaient de sites d'entreposage.

Projet de construction avec changement d'affectation

Les proches environs du terrain à bâtir doivent aussi être évalués. Il peut y avoir un danger par exemple lorsqu'une fouille ou un coffrage touchent une source de pollution gazeuse à proximité et créent ainsi de nouvelles voies de diffusion de l'air interstitiel contaminé entre la source de pollution et la nouvelle construction (fig. 1).

Nouvelles voies de diffusion

La profondeur de prélèvement des échantillons dépend de l'ouvrage prévu. Suivant les circonstances, des mesures supplémentaires devront être effectuées ultérieurement depuis le fond de la fouille pendant la phase des travaux.

Lorsque des projets de construction se situent dans le périmètre d'anciens sites de stockage, il faut faire particulièrement attention pendant les travaux aux dangers présentés par les gaz de décharge (asphyxie, empoisonnement, explosion, etc.), qui peuvent s'accumuler dans la fouille, dans la fosse de fondation ou les tranchées des canalisations (cf. 3.1 et 4.1). Si ce risque existe, il faut effectuer des mesures de contrôle. La sécurité au travail sur le chantier doit faire l'objet d'une évaluation spécifique (OPair; [17], [18]).

Sécurité au travail sur les chantiers

5 > Prélèvement des échantillons

Dans les techniques de prélèvement d'échantillons spécifiquement destinés aux analyses d'air interstitiel, on distingue les méthodes *passives* et les méthodes *actives* (cf. comparaison de méthodes à l'annexe A4).

5.1 Méthode passive

Dans la méthode passive, un collecteur («sampler») muni d'une couche / charge adsorbante (Tenax, charbon actif, etc.) est enterré et conservé pendant un certain temps dans le sol. Les collecteurs passifs ne permettent de tirer des conclusions que sur la qualité d'une contamination, et leur utilisation ne s'est pas imposée dans le domaine des analyses d'air interstitiel

Collecteur passif

5.2 Méthodes actives

Dans les méthodes actives, on distingue la méthode directe et la méthode par enrichissement (cf. annexe A4), auxquelles s'ajoute le procédé dit MIP, décrit au point 5.2.3.

La méthode directe consiste à collecter directement les échantillons d'air interstitiel dans des flacons headspace, des ampoules ou des sachets de gaz. Cette technique convient pour toutes les substances volatiles (point d'ébullition <80° C) de l'OSites, à savoir: méthane, essence et adjuvants ainsi que les groupes de substances «hydrocarbures halogénés» et «hydrocarbures aromatiques monocycliques». Le dioxyde de carbone et l'hydrogène sulfuré peuvent être mesurés directement sur place.

Méthode directe

La méthode par enrichissement consiste à pomper un volume défini d'air interstitiel à travers un collecteur approprié où les analytes sont adsorbés dans des tubes d'adsorption. Cette technique convient pour la détermination des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP, y compris naphtalène et benzo(a)pyrène), de même que pour le mercure.

Méthode par enrichissement

Parmi les différentes techniques existantes de prélèvement d'échantillons d'air interstitiel (cf. DIN [7], VDI ISO [17], ITVA [11], divers guides de länder allemands^{[1], [2], [13]}), c'est la méthode active, adaptée en fonction des conditions du sous-sol, qui s'est imposée en Suisse.

Deux techniques sont utilisées:

- > aspiration à travers des sondes creuses, ou
- > aspiration à travers un packer (en association avec des carottages)

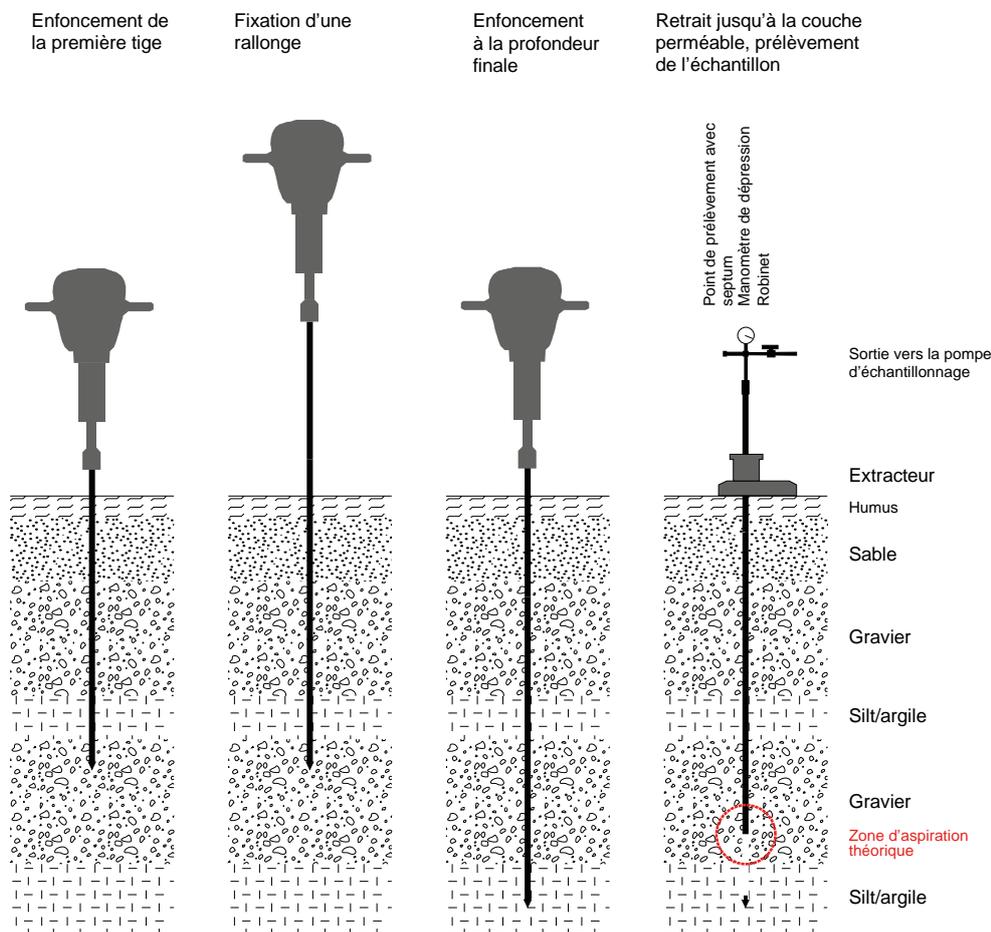
5.2.1 Prélèvement des échantillons à l'aide de sondes creuses

La méthode active usuelle aujourd'hui en Suisse consiste à enfoncer des sondes creuses en acier à pointe perdue dans le sous-sol au moyen d'un marteau électrique. La profondeur d'enfoncement se situe en général entre 1,5 m et 2,5 m (fig. 3), mais peut être augmentée selon les besoins. Les limites sont déterminées par les propriétés des matériaux du sous-sol (possibilités de battage). En cas d'utilisation de rallonges, il faut s'assurer que les raccords à vis sont étanches aux gaz afin d'éviter que de l'air interstitiel soit aspiré à ces endroits. Des profondeurs d'enfoncement plus importantes sont possibles, mais les raccords des rallonges constituent des points faibles mécaniques, et le risque de rupture de la sonde s'accroît avec la profondeur, surtout dans les graviers grossiers denses. Les sondes à pointe perdue ne peuvent pas être enfoncées plus profondément après le prélèvement de l'échantillon. Il faut donc une autre sonde pour chaque profondeur de prélèvement. Pour relever un profil de la distribution verticale des polluants, il est par conséquent préférable de recourir à la technique «Membrane Interface Probe» (MIP) (cf. point 5.2.3).

Sondages par battage

Fig. 3 > Sondage par battage pour le prélèvement d'échantillons d'air interstitiel

Sondes creuses en acier



Les surfaces imperméabilisées par du béton ou des revêtements bitumineux doivent être préalablement ouvertes, le béton de préférence par carottage. Le diamètre de forage doit être suffisant (env. 100 mm) pour que d'éventuelles pierres d'un coffrage puissent être enlevées à la main. Si le point de prélèvement de l'échantillon se trouve dans un bâtiment, il faut s'assurer que la hauteur au-dessus de l'emplacement choisi soit suffisante pour installer le dispositif de battage (marteau électrique + sonde \approx 2,5 m). Après le battage, la sonde creuse est retirée de 10 à 20 cm à l'aide de l'extracteur afin de libérer la pointe perdue (vérification au moyen d'une tige de contrôle). Ensuite, la tête de prélèvement équipée d'un septum, d'un manomètre à dépression et d'une sortie avec robinet est vissée sur la sonde. Toutes les parties en contact avec l'air interstitiel doivent être composées de matériaux inertes. Pour éviter le transfert de contamination, il faut utiliser une sonde propre pour chaque point de prélèvement.

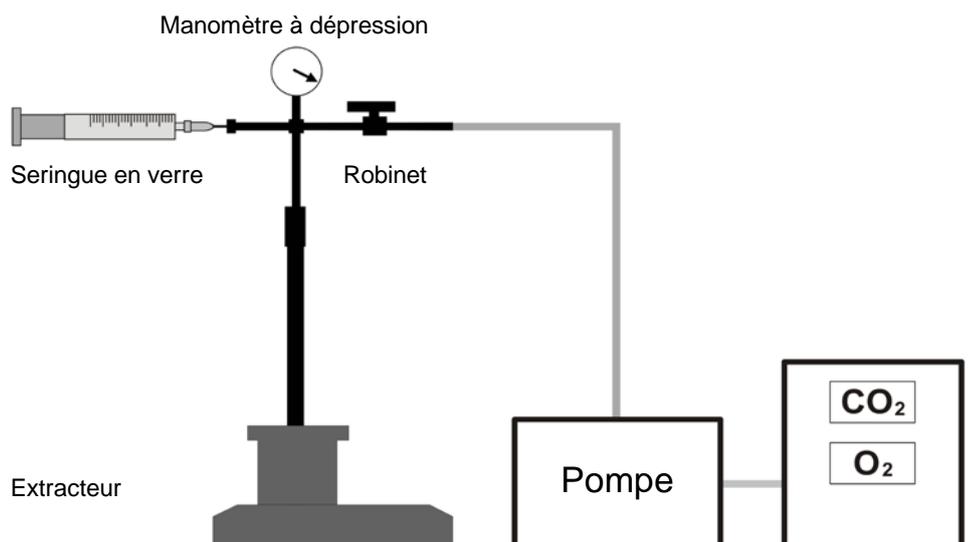
Surface imperméabilisée

Transfert de contamination

Le manomètre à dépression sert à s'assurer que la zone ouverte est suffisamment perméable aux gaz pour y prélever des échantillons. Si ce n'est pas le cas (argile, silt, eaux souterraines, etc.), la sonde est retirée jusqu'à un niveau où le prélèvement est possible. Un volume d'air interstitiel défini est alors pompé à la sortie de la tête de prélèvement avec une pompe à petit débit – il ne faudrait pas dépasser 2 l/min. pour éviter de produire une dépression –, en veillant à maintenir un débit le plus régulier possible. Avant le prélèvement de l'échantillon, il faut aspirer un volume égal à au moins trois fois le volume de la sonde. L'étanchéité du dispositif à l'air environnant est contrôlée pendant le prélèvement de l'échantillon par des mesures de la teneur en oxygène et en dioxyde de carbone de l'air interstitiel aspiré (fig. 4).

Aspiration préliminaire de l'air de la sonde

Fig. 4 > Représentation schématique du dispositif d'échantillonnage



Dans le cas de la technique directe avec prélèvement d'échantillons dans des flacons headspace, le robinet de sortie vers la pompe est fermé après aspiration de 5 à 10 l d'air interstitiel. Un échantillon est alors prélevé avec une seringue en verre à travers le septum de la tête de prélèvement, et injecté dans un flacon headspace vidé de son air (fig. 4 et fig. 5). Une autre possibilité est de vider et remplir le flacon headspace avec de l'air interstitiel au moyen de deux canules. L'air environnant doit avoir été échangé au moins cinq fois avec de l'air interstitiel avant le remplissage de l'échantillon (fig. 6). Il faut utiliser une seringue en verre propre pour chaque échantillon. Les seringues jetables en plastique sont à proscrire, car elles peuvent absorber ou libérer des substances à analyser. Les **sachets à gaz** quant à eux sont remplis à la sortie de la pompe. **Ils ne conviennent pas pour le prélèvement d'échantillons de HCFC et doivent être réservés aux échantillons de gaz de décharge et d'isotopes.**

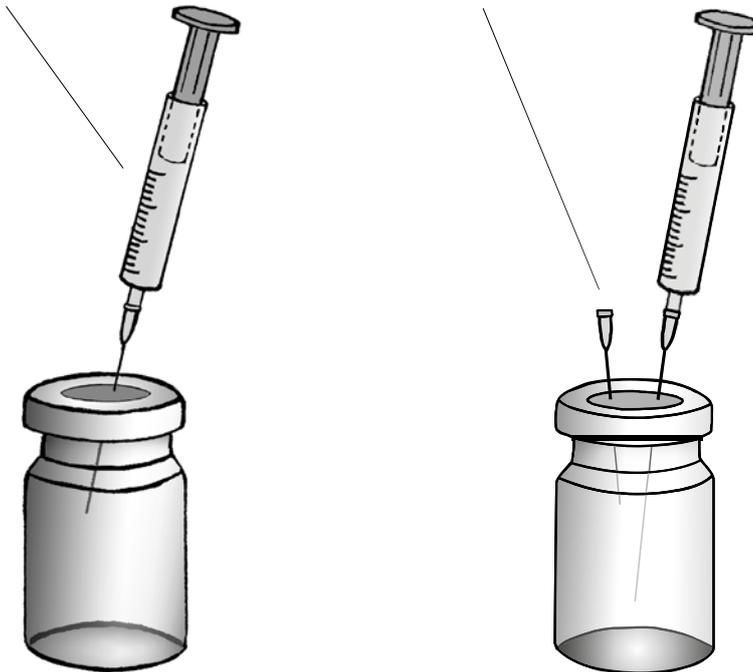
Prélèvement d'échantillons dans des flacons headspace ou des sachets de gaz

Fig. 5 > Remplissage de l'échantillon d'air interstitiel dans un flacon headspace vidé de son air

Fig. 6 > Remplissage de l'échantillon d'air interstitiel dans un flacon dont le contenu a auparavant été remplacé cinq fois par de l'air interstitiel

Contrôle du volume

Deuxième canule



La méthode par enrichissement consiste à aspirer un volume défini d'air interstitiel à travers un tube d'adsorption fixé entre la pompe et la sortie de la tête de prélèvement afin de charger le matériau adsorbant. Suivant la méthode, le volume d'air peut varier entre 0,5 l et 150 l. Le remplissage des ampoules s'effectue de manière analogue. Le tuyau reliant la tête de prélèvement au tube d'adsorption et à l'ampoule doit être composé d'un matériau inerte (silicone, téflon) qui ne peut pas absorber ou libérer des substances à analyser.

Prélèvement avec des tubes d'adsorption

Les échantillons d'air interstitiel destinés aux analyses headspace doivent être entreposés à l'abri de la lumière. Les tubes d'adsorption doivent en plus être conservés au frais pour éviter une désorption thermique. Les échantillons doivent être analysés dans un délai de 24 à 48 heures au maximum.

Entreposage des échantillons

Un protocole détaillé est établi pour chaque prélèvement d'échantillon afin que la procédure et les conditions ambiantes soient documentées de manière complète et compréhensible. Les principaux points à consigner dans le protocole sont indiqués à l'annexe A3.

Protocole de prélèvement

5.2.2 Prélèvement avec un packer

Les surfaces imperméabilisées par du béton ou des revêtements bitumineux doivent être percées pour permettre l'accès de la sonde de prélèvement. L'orifice de forage est étanchéifié avec une garniture d'étanchéité («packer») (fig. 7). L'échantillon d'air interstitiel peut être prélevé à travers le packer. Cette méthode est surtout indiquée lorsqu'une carotte est retirée à travers le trou de forage et qu'il n'est donc pas possible d'utiliser des sondes creuses. Elle comporte toutefois une incertitude concernant la provenance exacte de l'air interstitiel, car le plus gros afflux d'air proviendra de la couche à la perméabilité relative la plus élevée.

Prélèvement d'échantillons sur des surfaces en dur

Prélèvement à l'aide d'un tube

Les packers peuvent aussi être utilisés pour des prélèvements à partir de tubes perforés de points de mesure de l'air interstitiel ou des stations de mesure des eaux souterraines (fig. 8). Dans ces cas, il est important de connaître le volume mort, car il faut aspirer un volume égal à au moins deux ou trois fois celui-ci avant le prélèvement de l'échantillon.

Fig. 7 > Prélèvement d'air interstitiel sous une surface en dur (orifice étanchéifié avec un packer)

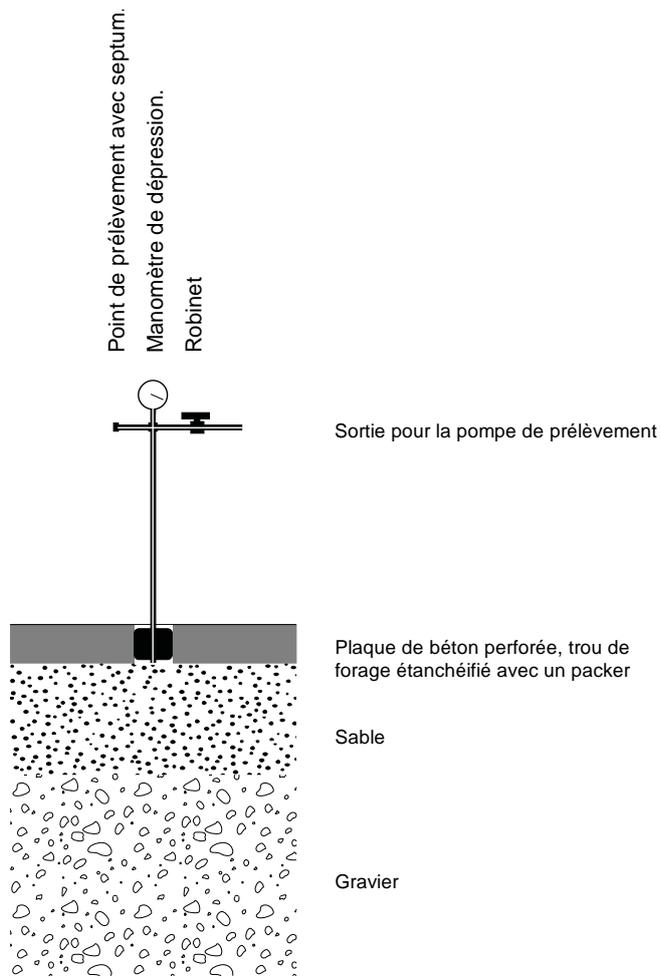
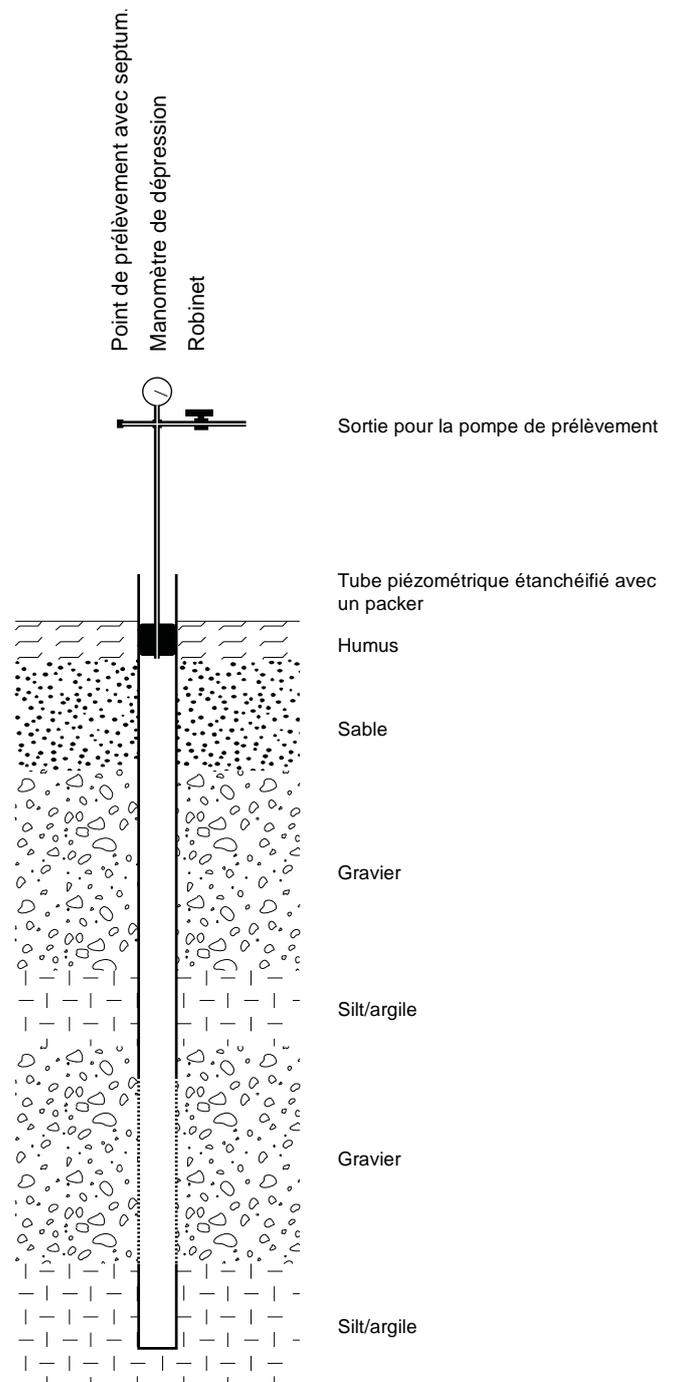


Fig. 8 > Prélèvement d'air interstitiel à partir de tubes de points de mesure de l'air interstitiel ou de stations de mesure des eaux souterraines (orifice étanchéifié avec un packer)



5.2.3 Membrane Interface Probe (MIP)

Une autre technique de prélèvement et d'analyse qui a fait ses preuves depuis quelques années en Suisse est le *MIP*, *Membrane Interface Probe*. Cette méthode de type *direct-push* permet d'effectuer un screening dont le principal avantage est de fournir des données spatiales sur la distribution des substances volatiles dans le sous-sol.

Sondages MIP

A la différence des méthodes présentées plus haut qui sont spécifiquement prévues pour l'air interstitiel, le MIP permet aussi de mener des investigations dans la zone saturée. Une sonde fixée à l'extrémité d'une tige de battage est enfoncée dans le sous-sol. Elle est chauffée à environ 120° C pour volatiliser entièrement les polluants, qui passent à travers une membrane dans un capillaire rempli d'un gaz porteur où ils sont transportés jusqu'à des appareils d'analyse (PID, FID, DELCD). Toutes les substances avec un point d'ébullition inférieur à 120° C mesurables avec ces détecteurs peuvent ainsi être analysées de manière semi-quantitative.

Cette méthode très flexible fournit des profils à haute résolution de la distribution en profondeur des polluants. Elle donne en outre des informations sur la constitution lithologique sur la base de mesures de la conductivité. Si les sondages sont suffisamment nombreux, elle permet d'élaborer une représentation tridimensionnelle de la répartition des polluants.

A la différence des autres méthodes actives de mesure de l'air interstitiel, cette technique ne permet pas de mesurer des substances spécifiques, mais seulement la somme de groupes de polluants (hydrocarbures chlorés, BTEX). Comme toutes les méthodes par battage, le MIP montre ses limites dans les sous-sols très durs difficiles à pénétrer (p. ex. gravier grossier, moraine dure). Le battage est effectué avec une machine sur chenilles dont la taille limite les possibilités d'utilisation dans des bâtiments, en particulier dans des caves.

5.3 Volume relevé par l'échantillonnage

Le volume de sous-sol analysé autour de la sonde dépend du volume des pores et de la perméabilité de la zone concernée. L'annexe A2 donne une représentation graphique du diamètre de la sphère correspondante pour différents volumes de pores et d'air aspiré, en partant de l'hypothèse idéale d'une zone d'influence conique avec un espace poral homogène et sec.

5.4 Assurance de la qualité

L'expérience montre que la principale source d'incertitude est l'échantillonnage lui-même. Cette tâche exigeante doit être planifiée et exécutée par une personne compétente.

Les points suivants sont importants pour l'assurance de la qualité. Ils doivent être respectés par la personne prélevant les échantillons et par le laboratoire d'analyse, et consignés dans un rapport de mesure:

- > description du déroulement de l'échantillonnage, des appareils utilisés, des instruments ainsi que des moyens auxiliaires nécessaires à la détermination des paramètres de terrain;
- > étiquetage clair des récipients contenant les échantillons;
- > tenue d'un registre de tous les échantillons prélevés;
- > prélèvement, transport et stockage appropriés des échantillons de manière à éviter autant que possible toute altération du matériel prélevé;
- > nettoyage ou remplacement des appareils utilisés entre les prélèvements de deux échantillons différents, afin d'éviter les transferts de contamination.

6 > Analyse

6.1 Généralités

Les analyses de l'air interstitiel doivent être effectuées selon des méthodes standardisées (DIN^{[6], [7]}, VDI^[20]). En général, les échantillons sont analysés en laboratoire, mais ils peuvent aussi être étudiés sur le lieu de prélèvement dans un laboratoire mobile avec des méthodes *in situ*. Outre les résultats avec seuils de quantification, le protocole doit également donner des indications sur les méthodes utilisées.

Protocole d'analyse

Limites de quantification

Pour les substances figurant à l'annexe 2 de l'OSites, l'incertitude de mesure dans les zones de valeurs de concentration indiquées varie entre 7 % et 15 %. D'une manière générale, on considère que plus la valeur mesurée est basse, plus l'incertitude de mesure est élevée.

Incertainde de mesure

La valeur indiquée à l'annexe 2 de l'OSites pour *l'essence exempte de composants aromatiques* correspond à la somme des hydrocarbures ayant un point d'ébullition entre 80 et 200° C sans les composants aromatiques benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes.

La valeur indiquée pour *l'essence minérale légère (teneur en composants aromatiques 0 à 10 %)* correspond à la somme des hydrocarbures et composants aromatiques ayant un point d'ébullition entre 70 et 90° C.

6.2 Méthodes d'analyse

Les substances organiques volatiles contenues dans l'air interstitiel sont normalement analysées par chromatographie en phase gazeuse. Les composants organiques collectés sont séparés sur une colonne de séparation, puis quantifiés au moyen d'un détecteur approprié.

Les techniques les plus utilisées sont la GC-ECD/FID: séparation par chromatographie gazeuse combinée avec un détecteur de groupes spécifiques ECD (détecteur à capture d'électrons) et un détecteur non spécifique FID (détecteur à ionisation de flamme), et la GC-MS: séparation par chromatographie gazeuse combinée avec un détecteur moléculaire spécifique MSD (détecteur de masse sélectif).

Les concentrations de méthane, de dioxyde de carbone, d'oxygène et d'hydrogène sulfuré peuvent être déterminées (en ligne) avec des appareils de mesure des gaz pendant le prélèvement de l'échantillon.

D'autres méthodes, comme les tubes de mesure à indication directe ou les mesures avec un détecteur à photo-ionisation (PID), fournissent des informations sur la présence de pollutions. Elles permettent d'effectuer une première estimation qualitative de la contamination mais ne se prêtent pas à des interprétations quantitatives.

6.2.1 Analyse selon la méthode directe

Cette méthode convient pour toutes les substances indiquées à l'annexe 2 de l'OSites à l'exception des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). L'annexe A1 contient la liste des substances pour lesquelles des valeurs de concentration au sens de l'annexe 2 OSites sont disponibles.

La détermination analytique par chromatographie en phase gazeuse se fait par mesure directe du gaz à partir des flacons headspace. Le choix du détecteur et du matériel de la colonne est fonction de l'expérience et de l'infrastructure du laboratoire. Les limites de détection, la sélectivité et le nombre de substances détectables sont déterminés par la technique utilisée. La GC-MS a l'avantage de permettre une détection spécifique sur une gamme étendue de substances, alors que la combinaison GC-ECD/FID est moins coûteuse au niveau des appareils et de l'utilisation.

6.2.2 Analyse selon la méthode par enrichissement

Cette méthode convient pour les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) indiqués à l'annexe 2 de l'OSites, ainsi que pour le mercure.

Les HAP sont déterminés par chromatographie en phase gazeuse ou liquide après désorption de l'adsorbant par un solvant, ou par chromatographie en phase gazeuse après désorption thermique de l'adsorbant.

Le mercure est analysé avec un spectromètre à absorption atomique en vapeur froide (CV-AAS) après désorption liquide.

La méthode par enrichissement permet aussi d'analyser avec une meilleure limite de détection la plupart des substances de l'annexe 2 de l'OSites. L'amélioration de la limite de détection est proportionnelle à l'enrichissement dans le tube d'adsorption. Cependant, il est rare que toutes les substances organiques de l'annexe A1 puissent être déterminées simultanément avec le même résorbant à partir du même tube d'adsorption.

En raison du travail occasionné par le prélèvement et l'analyse des échantillons et des nombreux facteurs ayant une influence sur les résultats, la méthode par enrichissement est une technique compliquée et chère. En général, la méthode directe permet d'atteindre des seuils de quantification conformes aux exigences de l'OSites.

6.3 Assurance de la qualité

Les laboratoires d'analyse exerçant des activités dans le domaine de l'environnement doivent travailler selon la norme SN EN ISO/IEC 17025^[24]. Pour les travaux en relation avec les analyses d'air interstitiel, une accréditation selon la norme ISO/IEC 17025 est recommandée.

Les éléments suivants sont importants pour l'assurance de la qualité, ils doivent être respectés par le laboratoire et consignés dans un rapport de mesure:

- > Chaque laboratoire doit valider les méthodes qu'il met en œuvre.
- > Pour chaque procédure, il doit au moins connaître les caractéristiques suivantes:
 - domaine d'application
 - pouvoir de détection (p. ex. seuil de quantification)
 - précision et exactitude
 - incertitude de mesure
 - spécificité, sélectivité
- > Les méthodes qui ne sont pas indiquées dans le domaine d'accréditation selon la norme SN EN ISO/IEC 17025 doivent être signalées dans le rapport d'analyse.

La reproductibilité des résultats des analyses doit être attestée par l'utilisation de standards certifiés. Les appareils de mesure utilisés et les moyens de vérification doivent faire l'objet d'une calibration interne et être documentés.

7 > Interprétation des résultats

7.1 Généralités

Plusieurs points à prendre en considération dans les rapports sur les mesures d'air interstitiel ont déjà été évoqués: description des bâtiments et des environs, constitution géologique du sous-sol, régime des eaux souterraines. En règle générale, les analyses de l'air interstitiel ne représentent qu'une partie des investigations menées sur un site.

Rapport sur les mesures d'air interstitiel

Les résultats sont interprétés en partant des questions étudiées. Il faut indiquer si le programme de mesures a été réalisé comme prévu, et dans le cas contraire il est recommandé de documenter et de justifier les changements et de présenter leurs conséquences éventuelles.

Il convient par ailleurs de discuter de la représentativité des résultats, car ceux-ci constituent une base de décision importante pour les autorités compétentes. Les expériences faites jusqu'ici dans le domaine des mesures d'air interstitiel tout comme les réflexions théoriques montrent qu'il faut porter une attention particulière aux points suivants:

Représentativité des mesures

- > les mesures de l'air interstitiel ne peuvent pas être simplement répétées dans les mêmes conditions, contrairement aux analyses des eaux souterraines qui sont plus facilement reproductibles;
- > les résultats des mesures de l'air interstitiel ne sont valables que pour un volume relativement limité, de fortes fluctuations à petite échelle sont plutôt la règle que l'exception;
- > les concentrations de l'air interstitiel dépendent aussi de facteurs externes;
- > les concentrations de l'air interstitiel ne donnent pas d'indications directes sur les volumes de gaz existants (important pour les gaz de décharge).

7.2 Facteurs influençant les concentrations de l'air interstitiel

Les principaux facteurs externes sont les conditions météorologiques, l'imperméabilisation de la surface ainsi que la perméabilité et la composition de la roche-réservoir (proportion de particules adsorbées, en particulier de carbone organique).

Pour interpréter les mesures de substances volatiles, en particulier des HCC, il faut aussi tenir compte de l'humidification du sous-sol par les infiltrations d'eau de pluie. Cette dernière influence les concentrations et diminue ainsi considérablement la reproductibilité des mesures d'air interstitiel. Les fluctuations sont très marquées lorsque les échantillons sont prélevés par temps pluvieux. Dans les sols humides, les concentra-

tions peuvent aussi bien augmenter que diminuer, et dans des proportions pouvant facilement atteindre un facteur de cinq.

Il faut donc en tenir compte pour l'interprétation des mesures, surtout si l'on compare des valeurs relevées à des moments différents.

Si l'interprétation des concentrations d'air interstitiel sert à déterminer la pollution d'une nappe phréatique, en particulier par des HCC, les restrictions supplémentaires suivantes liées au transfert vers la phase gazeuse doivent être prises en considération:

- > En présence de deux ou plusieurs niveaux de nappes différemment polluées, l'air interstitiel ne fournit d'indications que sur la nappe supérieure.
- > Les nappes perchées empêchent les échanges gazeux avec l'aquifère à proprement parler et ne permettent donc pas d'identifier une éventuelle pollution.

Il est important de connaître la constitution lithologique du sous-sol relevé lors des prélèvements d'air interstitiel. Il convient donc de procéder parallèlement ou éventuellement auparavant à des sondages pour obtenir une description géologique de la zone d'échantillonnage. Souvent réalisés par battage ou au moyen de petits forages, ces sondages fournissent des indications au moins qualitatives sur l'homogénéité, la granulométrie, la porosité, l'humidité et (avec des analyses complémentaires) sur la teneur en carbone organique.

Constitution lithologique
du sous-sol

7.3 Teneurs de fond naturelles en substances volatiles

7.3.1 Hydrocarbures chlorés

Les informations sur les teneurs de fond naturelles sont utiles en particulier pour l'interprétation et l'évaluation de contaminations très faibles de l'air interstitiel par des hydrocarbures chlorés. Il n'existe pas beaucoup de données dans ce domaine. Selon une synthèse réalisée en Allemagne^[14], voici les teneurs de fond possibles:

Teneurs de fond des HCC

Tab. 1 > Teneurs de fond des HCC

Teneur de fond naturelle	Zone d'exploitation agricole et forestière	Zone forestière, pluviométrie annuelle élevée	Zone urbaine
Tétrachloréthène	<0,001–0,002 ml/m ³	0,001–0,007 ml/m ³	0,001–0,004 ml/m ³
Trichloréthène	<0,001–0,002 ml/m ³	0,001–0,006 ml/m ³	0,001–0,004 ml/m ³
1,1,1-Trichloréthane	<0,001–0,002 ml/m ³	<0,001–0,001 ml/m ³	<0,001 ml/m ³

Ces données permettent de constater que les teneurs de fond naturelles prévisibles sont très faibles, proches du seuil de quantification, et qu'elles ne peuvent donc pas être une source d'erreur pour l'évaluation de sites pollués. Mais elles montrent aussi que la présence de très faibles teneurs en HCC dans l'air interstitiel ne signifie pas forcément que ces substances ont été utilisées sur le site.

7.3.2 Dioxyde de carbone, méthane et hydrogène sulfuré

L'air interstitiel contient du **dioxyde de carbone** en proportions variables, lesquelles fluctuent en fonction des conditions d'aération, de l'humidité (en conditions sèches, la production de dioxyde de carbone d'origine organique est réduite) ainsi que des particularités spécifiques du site (température, conditions d'équilibre calcaire-eau-air, dioxyde de carbone géogène). A cela s'ajoutent des fluctuations saisonnières. Il n'est pas rare que les teneurs en dioxyde de carbone atteignent 2 % dans un sous-sol bien aéré, et même nettement plus dans un sous-sol mal aéré.

La valeur de concentration pour le dioxyde de carbone selon l'annexe 2 de l'OSites est de 0,5 %. Des concentrations de cet ordre peuvent fort bien être d'origine naturelle. Par conséquent, pour l'évaluation de valeurs élevées de dioxyde de carbone dans l'air interstitiel, il faut toujours tenir compte des conditions locales, p. ex. en effectuant des mesures du niveau de fond hors de la zone d'influence de la décharge.

Dans les zones riches en substances organiques naturelles dégradables, la décomposition bactérienne en conditions anaérobies peut engendrer la formation de méthane. Il en va de même pour l'hydrogène sulfuré qui, dans des conditions très anoxiques, peut entraîner une contamination naturelle du sous-sol.

Quand l'évaluation d'un site pollué se base également sur des mesures de l'air interstitiel, il faut tenir compte des particularités mentionnées plus haut lors de la mesure de faibles concentrations de ces gaz.

7.4 Evaluation selon la législation sur les sites contaminés

La base d'évaluation des pollutions de l'air interstitiel mesurées de manière quantitative est l'annexe 2 de l'OSites. Les valeurs de concentration indiquées correspondent aux valeurs (limites) moyennes d'exposition aux postes de travail (VME) de la Suva (Caisse nationale suisse d'assurance en cas d'accidents). Celles-ci règlent la concentration maximale admise d'un polluant au poste de travail (cf.^[17]). Il en découle que pour qu'un assainissement soit nécessaire, il **ne suffit pas** qu'une valeur de concentration soit dépassée dans l'air interstitiel, mais **il faut aussi** que cet air pollué atteigne des endroits «dans lesquels des personnes peuvent se trouver **régulièrement pendant un certain temps**.» (art. 11 OSites).

Besoin d'assainir dans les endroits où des personnes se trouvent régulièrement pendant un certain temps

7.5 Estimation calculée de la teneur en polluants de l'eau de percolation et de la teneur totale en polluants à partir des concentrations de gaz dans l'air interstitiel

L'annexe 1, al. 4, de l'OSites prévoit que, s'il n'est pas possible de prélever des échantillons de l'eau de percolation, la concentration de cette dernière peut être calculée à partir des mesures de la concentration de l'air interstitiel. L'essentiel à retenir est que cette possibilité se réfère explicitement à l'eau de percolation et que la méthode décrite ci-dessous n'est donc pas appropriée pour calculer la pollution des eaux souterraines

par des substances organiques volatiles sur la base de la pollution de l'air interstitiel. Cette méthode ne devrait être utilisée qu'après un examen approfondi et en tenant compte des conditions physico-chimiques et hydrogéologiques du site.

La détermination des polluants organiques volatils dans un sous-sol non saturé d'eau part du principe que ces substances sont présentes en différentes proportions sous trois formes:

- > adsorbée sur la phase solide du sol,
- > dissoute dans l'eau interstitielle, et
- > gazeuse dans l'air interstitiel.

Conformément aux lois de la thermodynamique, un équilibre va s'établir après un certain temps entre les teneurs d'une substance dans les trois phases sol, eau et air. Le temps nécessaire pour atteindre cet équilibre dépend des distances et vitesses de diffusion. Etant donné que les distances de diffusion dans un film d'eau à la surface des particules (= eau de percolation) sont faibles et que les vitesses de diffusion dans l'air interstitiel sont élevées, l'équilibre entre l'eau de percolation et l'air interstitiel s'établit très rapidement, surtout si les distances de percolation sont longues, et donc que les temps de séjour dans la zone non saturée du sous-sol sont également longs.

La concentration de la substance étudiée dans l'eau de percolation et dans la frange capillaire de l'eau souterraine peut être calculée empiriquement à partir de la concentration de la phase gazeuse grâce à la loi sur l'équilibre de la répartition des phases. Le calcul se base sur la constante de Henry H spécifique à la substance, qui exprime la répartition de la substance entre l'air et l'eau^[4]:

Equilibre de la répartition des phases

Constante de Henry

$$H = \frac{\text{Concentration d'équilibre dans la phase gazeuse [mol/l]}}{\text{Concentration d'équilibre dans la phase liquide [mol/l]}} \quad [-]$$

Pour les substances dont la solubilité dans l'eau est limitée (<10 000 mg/l), on applique en outre la formule suivante:

$$H = \frac{\text{Pression de vapeur [Pa]}}{\text{Solubilité [mol/m}^3\text{]}} \times \frac{1}{RT} \quad [-]$$

H: constante de Henry

R: constante universelle des gaz [$J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$]

T: température absolue [K]

Comme la constante de Henry dépend de la température, la valeur H appliquée devrait être corrigée en conséquence. Les valeurs de l'annexe A2, valables pour une température de 10° C, peuvent néanmoins être utilisées pour obtenir des estimations. Cette façon de procéder correspond à la méthode par calcul prévue à l'annexe A1, al. 4, de

l'OSites lorsqu'il n'est pas possible de prélever des échantillons de l'eau de percolation comme équivalent de lixiviat.

Si les trois phases sont en équilibre, la concentration totale du polluant peut aussi être calculée selon les relations d'équilibre thermodynamiques à partir de la loi de répartition de la substance entre les phases.

Dans la pratique, cette méthode en soi correcte présente toutefois de gros inconvénients, notamment pour deux raisons:

- > il n'y a souvent pas d'état d'équilibre ou celui-ci reste très localisé;
- > d'autres paramètres doivent être connus pour pouvoir effectuer une évaluation fiable, à savoir: porosité, proportion de matière organique, proportion d'eau, masse de sorption des substances organiques sur la matrice du sol.

Si ces conditions ne sont pas remplies, la méthode fournit au mieux une évaluation grossière. Elle permet tout de même de calculer une concentration maximale de polluants en partant d'une estimation conservatrice des paramètres. Mais là encore, les résultats doivent être évalués de manière critique, car ils ne peuvent généralement pas être considérés comme représentatifs d'un site. Au mieux, l'état d'équilibre n'est que local.

Une évaluation dans le cadre de la législation sur les sites contaminés ne saurait s'appuyer uniquement sur ces estimations.

7.6 Assurance de la qualité

Les résultats des mesures d'air interstitiel et leurs interprétations devraient toujours être présentés de manière claire et compréhensible. Pour satisfaire à ces exigences, les données suivantes sont nécessaires:

- > *explications sur la stratégie de mesure*: étant donné que le cahier des charges doit être soumis à l'avis des autorités, la stratégie de mesure devrait déjà être présentée à ce stade de la procédure ou lors de la planification d'une investigation de détail;
- > *indication claire des points de mesure*: situation, profondeur ou zone de prélèvement des échantillons gazeux;
- > conditions observées ou présumées du sol et du sous-sol, niveau observé ou présumé de la nappe phréatique;
- > *documentation de l'échantillonnage*: rapport de mesure ou communication des résultats du laboratoire de mesure selon l'annexe A3;
- > indications sur la reproductibilité des résultats, sur les possibilités d'interpolation et extrapolation avec les incertitudes correspondantes;
- > représentation graphique des résultats, notamment représentation sur une carte de la distribution spatiale des concentrations des substances mesurées;
- > justification des changements éventuels apportés par rapport au programme de mesure prévu;
- > *pour les gaz de décharge*: évaluation des risques pour les personnes avec recommandations concernant les mesures éventuellement nécessaires.

> Annexes

A1 Propriétés physico-chimiques de substances volatiles pouvant se trouver dans des sites pollués

Tab. 2 > Propriétés physico-chimiques de substances volatiles pouvant se trouver dans des sites pollués

Substance	Formule brute	Masse molaire g/mol	Point d'ébullition °C	Coefficient de partage carbone org./eau K_{oc} (l/kg)	Constante de Henry ^a K_H (10° C)	Coefficient de partage n-oct./eau $\log f_{ow}$	Pression de vapeur Pa (25° C)	Solubilité g/l (25° C)
Substances inorganiques								
Mercure	Hg	200.59	356.58				160 ^a	0.00006 ^a
Dioxyde de carbone	CO ₂	44	-78.5					
Hydrogène sulfuré	H ₂ S	34.08	-60.7					
Substances organiques								
Essence (sans composés aromatiques)								
Essence légère (composés aromatiques 0–10 % vol.)								
Méthane	CH ₄	16.04	-164					
HC aromatiques monocycliques								
Benzène	C ₆ H ₆	78.12	80.1	92	0.115	2.1	10 200 ^a	1.77 ^a
Ethylbenzène	C ₈ H ₁₀	106.17	136		0.135		933–1 990 ^a	0.866 ^a
Toluène	C ₇ H ₈	92.15	111	250	0.124	2.4	2 910 ^a	0.5 ^a
m-xylène	C ₈ H ₁₀	106.17	139.1	166	0.125		800 ^a	0.16 ^a
o-xylène	C ₈ H ₁₀	106.17	144.4	48–68	0.087		667 ^a	0.19 ^a
p-xylène	C ₈ H ₁₀	106.17	138.7	204	0.130		880 ^a	0.18 ^a
HC halogénés volatils								
Chlorobenzène	C ₆ H ₅ Cl	112.56	132	77	0.065		1 310 ^a	0.46 ^a
1,1-dichloréthane	C ₂ H ₄ Cl ₂	98.96	57	38	0.123		30 900	5.06 ^a
1,2-dichloréthane (EDC)	C ₂ H ₄ Cl ₂	98.96	83	31	0.019		11 200	8.65 ^a
1,1-dichloréthène	C ₂ H ₂ Cl ₂	96.94		47	0.634		79 400	2.49
cis-1,2-dichloréthène	C ₂ H ₂ Cl ₂	96.94	60	38	0.087		28 100	5.09
trans-1,2-dichloréthène	C ₂ H ₂ Cl ₂	96.94	60	48	0.212		40 700	6.26
Dichlorométhane (DCM)	CH ₂ Cl ₂	84.93	40	17	0.05	1.25	57 500	16.9
1,2-dichloropropane	C ₃ H ₆ Cl ₂	112.99	96	92	0.055	2.28	6 900	2.8
1,1,2,2-tétrachloréthane	C ₂ H ₂ Cl ₄	167.86	146	225	0.0056	2.72	794	3.27
Tétrachloréthène (PER)	C ₂ Cl ₄	165.83	121	374	0.331	2.76	2 500	0.141
Tétrachlorméthane	CCl ₄	153.82	76.7	238	0.642		14 500	0.826
1,1,1-trichloréthane	C ₂ H ₃ Cl ₃	133.42	74	119	0.362		16 600	1.3
Trichloréthène (TRI)	C ₂ HCl ₃	131.39	87	185	0.204	3.07	10 800	1.09

Substance	Formule brute	Masse molaire g/mol	Point d'ébullition °C	Coefficient de partage carbone org./eau K_{oc} (l/kg)	Constante de Henry ^a K_H (10° C)	Coefficient de partage n-oct./eau $\log f_{ow}$	Pression de vapeur Pa (25° C)	Solubilité g/l (25° C)
Trichlorméthane	CHCl ₃	119.38	61.7	71	0.0794	1.97	25 100	8.45
Chlorure de vinyle	C ₂ H ₃ Cl	62.50	-13.37	5	0.750		400 000	2.8

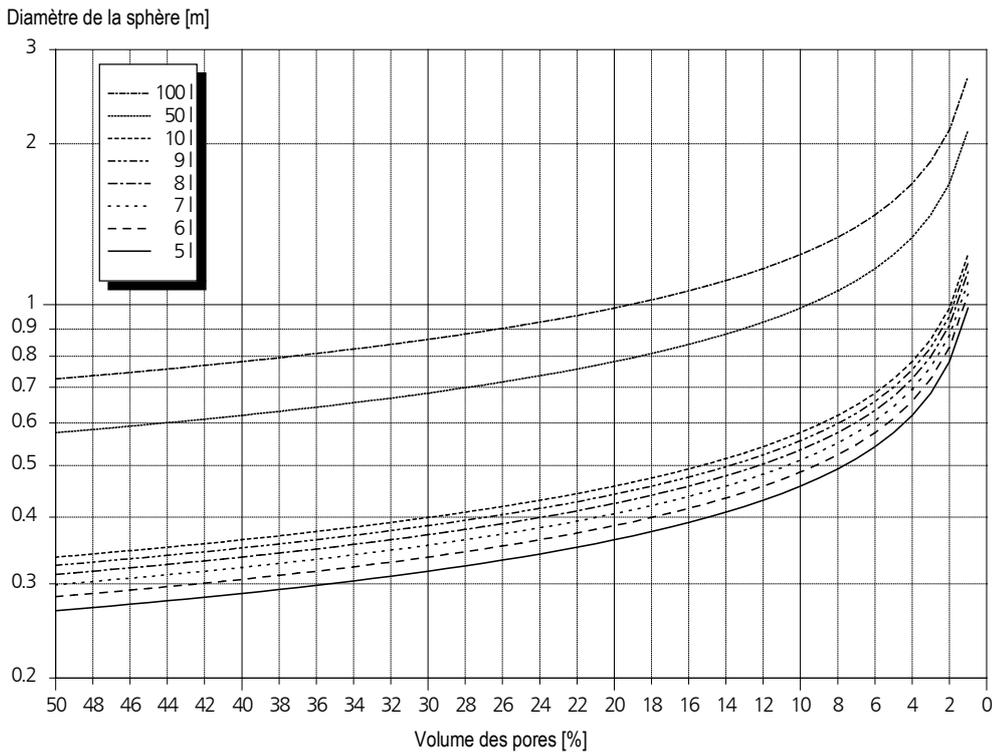
HC polycycliques aromatiques

Benzo(a)pyrène	C ₂₀ H ₁₂	252.3	496	4 500 000		6.6–6.78	0.7*10 ⁻⁶ a	4.5µg/l a
Naphthalène	C ₁₀ H ₈	128.19	218	790		3.37	7.2 ^a	0.025 ^a

^a de [23]

A2 Volumes relevés lors du prélèvement des échantillons

Fig. 9 > Diamètre de la sphère en fonction du volume des pores et de l'air aspiré



SJ GeoTec AG, 2010

L'hypothèse selon laquelle la géométrie du volume pour le calcul des courbes serait de forme sphérique ne correspond pas à la réalité, car le sous-sol est rarement homogène. La géométrie du volume de l'air aspiré est en réalité très irrégulière et pratiquement impossible à prévoir.

Dans des conditions naturelles, il faut donc plutôt partir du principe que la porosité et la perméabilité dans la zone à l'extrémité de la sonde varient à petite échelle. D'autre part, la teneur en eau des pores dans la zone non saturée, qui influence aussi la perméabilité, n'est généralement pas connue. Il faut en outre considérer que l'air interstitiel se déplace comme l'eau souterraine par des voies d'écoulement préférentielles. Ces différents facteurs font que le volume de matériel concerné par le prélèvement de l'échantillon est pratiquement impossible à quantifier avec une certitude suffisante. Le diagramme fournit néanmoins des indications sur l'ordre de grandeur de la zone d'influence qui peuvent être utilisées pour l'interprétation des résultats.

A3 Documentation de l'échantillonnage

Tab. 3 > Documentation de l'échantillonnage

Classement de l'échantillon	Projet	
	Désignation exacte de l'échantillon (selon schéma du site)	
	Date et heure de prélèvement de l'échantillon	
	Terrain	<ul style="list-style-type: none"> • non bâti • bâti • agricole • forêt • imperméabilisé
	Contamination	<ul style="list-style-type: none"> • directe • indirecte
Conditions météorologiques lors du prélèvement de l'échantillon	Température de l'air	• intérieure/extérieure
	Pression atmosphérique	
	Temps	<ul style="list-style-type: none"> • sec • humide
Technique utilisée	Forage préliminaire	<ul style="list-style-type: none"> • revêtement bitumineux • béton • carottage • hélicoïdal • profondeur
	Sonde à air interstitiel	<ul style="list-style-type: none"> • sonde creuse • packer
	Profondeur d'enfoncement	
	Profondeur d'aspiration	
	Débit de pompage	
	Volume total aspiré	
	Dépression éventuelle pendant le prélèvement de l'échantillon	
	Concentration de dioxyde de carbone pendant le prélèvement de l'échantillon	
	Teneur en oxygène pendant le prélèvement de l'échantillon	
	Observations concernant le sous-sol	<ul style="list-style-type: none"> • Matériel adhérent à la sonde • Couche impénétrable • Blocs • Eau et autres • Odeur de l'air interstitiel aspiré, etc.

A4 Comparaison des méthodes

Tab. 4 > Comparaison des méthodes I

	Méthodes directes			Méthodes par enrichissement	
	Flacons headspace	Ampoules/sachets de gaz	Membrane Interface Probe	Désorption thermique	Elution par un solvant
Procédure	<ul style="list-style-type: none"> L'échantillon de gaz est prélevé de la sonde à l'aide d'une seringue jetable. Injection dans les flacons headspace vidés de leur air. 	<ul style="list-style-type: none"> L'échantillon de gaz est directement aspiré de la sonde par couplage de la pompe avec le sachet ou l'ampoule de gaz. 	<ul style="list-style-type: none"> Les échantillons de gaz sont prélevés à partir de l'extrémité de la sonde chauffée à travers une membrane dans un capillaire où ils sont transportés par un gaz porteur jusqu'aux appareils de mesure à la surface du sol. 	<ul style="list-style-type: none"> Aspiration d'air interstitiel à travers un petit tube fixé à l'extrémité de la sonde ou au-dessus du niveau du terrain. Le volume d'air aspiré se base sur les indications du laboratoire/du fabricant. 	<ul style="list-style-type: none"> Aspiration d'air interstitiel à travers un petit tube fixé à l'extrémité de la sonde ou au-dessus du niveau du terrain. Le volume d'air aspiré se base sur les indications du laboratoire/du fabricant.
Opérations nécessaires	<ul style="list-style-type: none"> Transfert de l'échantillon gazeux du flacon headspace dans le GC. Calibrage avec un gaz standard fabriqué au laboratoire. 	<ul style="list-style-type: none"> Prélèvement de l'échantillon d'air interstitiel du sachet ou de l'ampoule de gaz avec une seringue. Calibrage avec un gaz standard fabriqué au laboratoire. 		<ul style="list-style-type: none"> Elution du gaz adsorbé par désorption thermique. Injection directe dans le GC. Calibrage avec des solutions standard fabriquées au laboratoire. 	<ul style="list-style-type: none"> Elution du gaz adsorbé par un solvant. Injection directe du liquide dans le GC. Calibrage avec des solutions standard fabriquées au laboratoire.
Sources d'erreur	<ul style="list-style-type: none"> Septum non étanche. Fuite du septum. Pertes par adsorption et diffusion à la surface ou à l'intérieur du septum. 	<ul style="list-style-type: none"> Sachets ou fermetures non étanches. Pertes par adsorption et diffusion à la surface ou hors du sachet de gaz. 	<ul style="list-style-type: none"> Transfert de contamination vers le bas. 	<ul style="list-style-type: none"> Adsorbant non approprié. Equilibre adsorption/désorption. Propriétés influencées par l'humidité. Rupture. 	<ul style="list-style-type: none"> Adsorbant non approprié. Equilibre adsorption/désorption. Propriétés influencées par l'humidité. Rupture.
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> Possibilité d'automatiser. Faible coût. Analyse de substances individuelles. Utilisable dans des bâtiments. 	<ul style="list-style-type: none"> Possibilité d'effectuer plusieurs analyses grâce aux échantillons plus grands. Analyse de substances individuelles. 	<ul style="list-style-type: none"> Possibilité d'effectuer des profils de polluants en profondeur. 	<ul style="list-style-type: none"> Possibilité d'automatiser, limite de détection très basse grâce à l'enrichissement. 	<ul style="list-style-type: none"> Possibilité d'automatiser, mesures multiples possibles, limite de détection très basse grâce à l'enrichissement.
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> Préparation des gaz standard, modification de la composition du gaz par adsorption et condensation, durée de stockage limitée, entrée d'air environnant. Possibilités limitées pour les profils profonds. 	<ul style="list-style-type: none"> Préparation des gaz standard, possibilité de modifier la composition du gaz par adsorption et condensation, durée de stockage limitée; ne peut pas être automatisée. Ne convient pas aux analyses de HCC. 	<ul style="list-style-type: none"> Ne fournit que des paramètres globaux de groupes de substances. Inutilisable dans des bâtiments (sauf dans halles industrielles). 	<ul style="list-style-type: none"> Une seule mesure possible. Désorption incomplète, concentrations éventuellement trop élevées. Coût des appareils 	<ul style="list-style-type: none"> Adsorption et désorption de certains composés éventuellement incomplète. Pic de solvant dans le GC.

Tab. 5 > Comparaison des méthodes II

	Sondes en acier	Packer avec forage (carotte)	
Sondage (fig. 3)	Les sondes en acier sont enfoncées dans le sous-sol à l'aide d'un marteau électrique. Les sections doivent être jointes de manière étanche. Profondeur de prélèvement minimale 1 mètre.	Sur les surfaces imperméabilisées, l'air interstitiel peut être aspiré à travers un packer, surtout lorsqu'une carotte a été prélevée au préalable.	
Aspiration fig. 3)	L'air interstitiel est aspiré à un débit maximal de 4 l/min. Avant le prélèvement de l'échantillon, il faut remplacer un volume d'air égal à au moins deux à trois fois le volume mort de la sonde ou du trou de forage. L'étanchéité par rapport à l'atmosphère est vérifiée par des mesures de la concentration d'oxygène et de dioxyde de carbone.		
	Méthode directe		Méthode par enrichissement
Prélèvement de l'échantillon	Flacons headspace utilisables pour les substances organiques volatiles.	Ampoules et sachets de gaz utilisables pour les gaz de décharge.	Tubes d'adsorption utilisables pour les substances organiques volatiles.
	L'air interstitiel est prélevé dans le courant d'aspiration avec une seringue en verre étanche aux gaz, puis transféré dans un flacon vidé de son air (contrôle du volume) (fig. 5)	Remplir les récipients sur le côté d'aspiration avant la pompe. ou rincé avec une deuxième canule en procédant comme suit: • échanger au moins cinq fois le contenu d'un flacon fermé avec de l'air interstitiel au moyen d'une deuxième canule, • aspirer pendant quelque temps à travers le flacon fermé avec une pompe à faible débit	Installer le tube sur le côté d'aspiration situé avant la pompe et aspirer à travers lui le volume d'air interstitiel indiqué.
Entreposage, transport	Les échantillons doivent être conservés à l'abri de la lumière.		Les tubes d'échantillonnage doivent être conservés à l'abri de la lumière et au frais.
Remarque	Les échantillons doivent être analysés dans les 24 à 48 heures au plus tard.		
	Analyse		
Méthode	Chromatographie en phase gazeuse; détecteurs: p. ex. détecteur à ionisation de flamme (FID), détecteur à capture d'électrons (ECD), spectromètre de masse (MS) ou détecteur par conductivité thermique (TCD).		

> Bibliographie

- [1] Bayrisches Landesamt für Umwelt 2010: Probenahme von Boden und Bodenluft bei Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen für die Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Gewässer. Merkblatt Nr. 3.8/4, Stand: 15. Februar 2010.
- [2] Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Hamburg 2001: Entnahme von Bodenluftproben. Merkblatt Nr. 9 Juli 2001.
- [3] Office fédéral de l'environnement OFEV 2011: Méthodes d'analyse dans le domaine des déchets et des sites pollués (état 2013). L'environnement pratique, déchets/sites contaminés, 1334, 80 p.
- [4] ChloroNet 2009: Guide des hydrocarbures chlorés (HCC). Propriétés et comportement dans l'environnement. Septembre 2009.
- [5] ChloroNet 2011: Investigation des sites pollués. Aide pratique. Version de novembre 2013.
- [6] DIN 38407 Teil 5: Gemeinsam erfassbare Stoffgruppen (Gruppe F). Nov 1991. Bestimmung von leichtflüchtigen Halogenkohlenwasserstoffen LHKW durch gaschromatographische Dampfraumanalyse (F5).
- [7] DIN 38407 Teil 9: Gemeinsam erfassbare Stoffgruppen (Gruppe F). Mai 1991. Bestimmung von Benzol und einigen Derivaten mittels Gaschromatographie (F9).
- [8] DIN ISO 10381-7: Qualité du sol – Échantillonnage. Oct. 2007 – Partie 7: Lignes directrices pour l'échantillonnage des gaz du sol (ISO 10381-7:2005)
- [9] Grathwohl P. 1989: Verteilung unpolarer Verbindungen in der wasserungesättigten Bodenzone am Beispiel leichtflüchtiger aliphatischer Chlorkohlenwasserstoffe (Modelversuche). Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten Reihe C Nr. 1, 1989.
- [10] Grathwohl P. 1998: Bodengasanomalien zur Schadenherderkennung. Eberhard-Karls-Universität Tübingen Altlastenforum Fortbildung Karlsruhe, November 1998.
- [11] Ingenieurtechnischer Verband Altlasten e.V. ITVA 2002: Richtlinie Bodenluftabsaugversuch, Stand März 2002, Richtlinie H1–1/02. Berlin 2002, 28 S. und Anhang.
- [12] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg LfU 1985: Leitfaden für die Beurteilung und Behandlung von Grundwasser-Verunreinigungen durch leichtflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe. Stuttgart, 1985.
- [13] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg LfU 2002: MTBE (Methyl-tertiär-butylether) als Kraftstoffzusatz – Fachgespräch am 21.2.2002 in Karlsruhe, Tagungsband Umweltbelastung durch die Nutzung von MTBE.
- [14] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg LfU 2006: Handlungsempfehlung Entnahme von Bodenluftproben. März 2006.
- [15] Reisinger C., Grathwohl P. 1996: Formulierung einer Verfahrensempfehlung zur Bestimmung der Emission leichtflüchtiger organischer Schadstoffe (LCKW, BTEX etc.) aus kontaminierten Böden (Berechnungsverfahren und Methoden); Im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg LfU. Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Geologisches Institut, Lehrstuhl für angewandte Geologie.
- [16] Schwille F. 1984: Leichtflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe in porösen und klüftigen Medien, Modelversuche. Bundesamt für Gewässerkunde, Koblenz, 1984.
- [17] Suva 2013: Valeurs limites d'exposition aux postes de travail 2013. Directive 1903.f, publication Suva 1903.f, www.suva.ch/waswo/1903.
- [18] Suva 2013: Prévention des explosions – principes, prescriptions minimales, zones. Feuille d'information 2153.f, édition revue et corrigée de mai 2013, www.suva.ch/waswo/2153.
- [19] VDI 3865 Blatt 2: Messen organischer Bodenverunreinigungen Jan 1998. Techniken für die aktive Entnahme von Bodenluftproben.
- [20] VDI 3865 Blatt 4: Messen organischer Bodenverunreinigungen. Dez 2000. Bestimmung von niedrigsiedenden organischen Verbindungen in Bodenluft durch Direktmessung.
- [21] Office fédéral de l'environnement OFEV 2013: Mesure des émissions des installations stationnaires (état 2013). L'environnement pratique n° 1320, 155 p.
- [22] Ordonnance du 26 août 1998 sur l'assainissement des sites pollués (Ordonnance sur les sites contaminés, OSites) (état le 1^{er} août 2012)
- [23] EPA United States Environmental Protection Agency. EPA On-line Tools for Site Assessment Calculation: www.epa.gov/athens/learn2model/part-two/onsite/esthenry.html
- [24] SN EN ISO/IEC 17025, édition: 2005–07: Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais (ISO/IEC 17025:2005).
- [25] VDI 3865 Blatt 1: Messen organischer Bodenverunreinigungen. Okt. 1992. Messplanung für die Untersuchung der Bodenluft auf leichtflüchtige organische Verbindungen.

- [26] Lewitz H. 2004: Bodenluftbeprobung: Ausbreitungsmechanismen gasförmiger Stoffe im Boden. Fachzeitschrift wlb Wasser, Luft und Boden Nr.3/4.
- [27] Hers I., Li L., Hannam S. 2004: Evaluation of Soil Gas Sampling and Analysis Techniques At a Former Petrochemical Plant Site. Environmental Technology, 25:7.
- [28] United States Environmental Protection Agency EPA 2006: Comparison of Geoprobe® PRT and AMS GVP Soil-Gas Sampling Systems with Dedicated Vapor Probes in Sandy Soils at the Raymark Superfund Site. November 2006.

> Répertoire

Figures

Fig. 1 Quadrillage pour le prélèvement d'échantillons dans une décharge	15
Fig. 2 Stratégie d'échantillonnage pour une aire d'exploitation	17
Fig. 3 Sondage par battage pour le prélèvement d'échantillons d'air interstitiel	21
Fig. 4 Représentation schématique du dispositif d'échantillonnage	22
Fig. 5 Remplissage de l'échantillon d'air interstitiel dans un flacon headspace vidé de son air	23
Fig. 6 Remplissage de l'échantillon d'air interstitiel dans un flacon dont le contenu a auparavant été remplacé cinq fois par de l'air interstitiel	23
Fig. 7 Prélèvement d'air interstitiel sous une surface en dur (orifice étanchéifié avec un packer)	25
Fig. 8 Prélèvement d'air interstitiel à partir de tubes de points de mesure de l'air interstitiel ou de stations de mesure des eaux souterraines (orifice étanchéifié avec un packer)	25
Fig. 9 Diamètre de la sphère en fonction du volume des pores et de l'air aspiré	38

Tableaux

Tab. 1 Teneurs de fond des HCC	32
Tab. 2 Propriétés physico-chimiques de substances volatiles pouvant se trouver dans des sites pollués	36
Tab. 3 Documentation de l'échantillonnage	39
Tab. 4 Comparaison des méthodes I	40
Tab. 5 Comparaison des méthodes II	41