

Guide pratique pour la caractérisation des gaz du sol et de l'air intérieur en lien avec une pollution des sols et/ou des eaux souterraines



Gestion des sites et sols pollués

Guide pratique pour la caractérisation des gaz du sol et de l'air intérieur en lien avec une pollution des sols et/ou des eaux souterraines

Ce guide a été rédigé conjointement par le Bureau des Recherches Géologiques et Minières (BRGM) et l'Institut National de l'Environnement industriel et des RISques (INERIS), à la demande du Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (MEEM).

Les éléments en lien avec l'air intérieur constituent une actualisation du rapport INERIS DRC-10-109454-02386B de 2010 avec la prise en compte, d'une part de l'évolution des connaissances et des outils et, d'autre part, des retours d'expérience et suggestions des utilisateurs de ce précédent document.

Ce guide a été rédigé à destination de la communauté des diagnostiqueurs, gestionnaires de sites, bureaux d'études, aménageurs, maître d'ouvrages, services de l'Etat, collectivités, scientifiques, impliqués dans la gestion raisonnée des sites et sols pollués, lorsque se pose la question de la qualité des gaz du sol et de l'air intérieur en lien avec une pollution des sols ou des eaux souterraines.

Il a été rédigé sur la base des éléments de connaissance scientifiques et techniques disponibles au moment de sa rédaction. Il pourra donc faire l'objet de mises à jour selon les retours d'expérience, les avancées en lien avec la problématique de gestion des sites et sols pollués, et les évolutions réglementaires et normatives.

Rédaction

Nicolas AUBERT, BRGM
Laurence LETHIELLEUX, INERIS

Contribution et relecture

Pierrick DEFOSSEZ, BRGM
Ingrid GIRARDEAU, BRGM
Daniel HUBE, BRGM

Corinne HULOT, INERIS
Fabien LION, BRGM
Caroline MARCHAND, INERIS

Vérification

Hubert LEPROND, BRGM

Nathalie VELLY, INERIS

Approbation

Martine RAMEL, INERIS

Laurent ROUVREAU, BRGM

Références

BRGM RP-65870-FR
INERIS-DRC-16-156183-01401A

Ce guide a fait l'objet d'une consultation publique, organisée par le MEEM entre juin et octobre 2015. Une réunion de restitution qui s'est tenue le 17 juin 2016, et à laquelle ont notamment participé l'ADEME, l'UPDS, l'INERIS, le BRGM et le MEEM, a permis de valider de façon collégiale les modifications apportées à la version initiale et d'apporter quelques modifications complémentaires pour tenir compte des retours de la consultation publique.

Version	Date de parution	Modifications
1.0	19/06/2015	Version initiale
2.0	20/05/2016	Prise en compte des commentaires suite à la consultation
3.0	25/11/2016	Prise en compte des commentaires suite à la réunion de restitution

Sommaire

1. Champ d'application du présent guide	3
1.1. CHAMP D'APPLICATION	3
1.2. POPULATIONS, SUBSTANCES ET LIEUX CONCERNÉS	4
2. Rappel sur le comportement des polluants volatils dans les gaz du sol et l'air intérieur / extérieur	5
2.1. ORIGINES POSSIBLES DES COMPOSÉS VOLATILS DANS LES GAZ DU SOL, L'AIR INTÉRIEUR / EXTÉRIEUR.....	5
2.2. COMPORTEMENT DES POLLUANTS	6
2.3. DYNAMIQUE DES GAZ DU SOL DANS LA ZONE NON SATURÉE VERS L'AIR INTÉRIEUR / EXTÉRIEUR	8
2.3.1. Transfert des composés volatils depuis les gaz du sol vers l'air intérieur / extérieur.....	9
2.3.2. Facteurs environnementaux impactant le transfert des gaz du sol vers l'air intérieur et l'air extérieur.....	12
2.3.3. Caractéristiques des bâtiments impactant le transfert des gaz du sol vers l'air intérieur.....	14
2.3.4. Synthèse des phénomènes de transfert des gaz du sol	17
3. Stratégie d'échantillonnage des gaz du sol	19
3.1. CONTEXTES DE GESTION EN LIEN AVEC LA CARACTÉRISATION DES GAZ DU SOL	19
3.1.1. Contexte général	19
3.1.2. Caractérisation d'une source sol	20
3.1.3. Caractérisation d'un panache dans la nappe phréatique.....	21
3.1.4. Caractérisation des gaz du sol au droit d'un bâtiment.....	21
3.1.5. Étude de faisabilité et suivi des concentrations dans les gaz du sol dans le cadre de travaux de dépollution	23
3.2. STRATÉGIE D'IMPLANTATION SPATIALE DES OUVRAGES DE PRÉLÈVEMENT ...	24
3.3. PÉRIODE, FRÉQUENCE ET DURÉE DES PRÉLÈVEMENTS.....	27
4. Stratégie d'échantillonnage de l'air intérieur	29
4.1. CONTEXTES DE GESTION EN LIEN AVEC LA CARACTÉRISATION DE L'AIR INTÉRIEUR	29
4.2. CARACTÉRISTIQUES SPÉCIFIQUES DE L'ENVIRONNEMENT AIR INTÉRIEUR ET DESCRIPTION DES LIEUX	33

4.3. STRATÉGIE D'IMPLANTATION SPATIALE DES POINTS DE PRÉLÈVEMENT	34
4.3.1. Pièces à étudier : pièces "échantillon"	34
4.3.2. Hauteur et localisation des prélèvements.....	35
4.3.3. Autres points de mesure : points de "l'environnement local témoin"	37
4.4. STRATEGIE D'ÉCHANTILLONNAGE TEMPOREL	39
4.4.1. Période et fréquence des prélèvements.....	39
4.4.2. Durée des prélèvements	40
5. Mise en place et préparation des ouvrages de prélèvement de gaz du sol.....	43
5.1. HYGIÈNE, SÉCURITÉ ET ENVIRONNEMENT	43
5.2. OUVRAGES PERMANENTS - PIÉZAIRES.....	43
5.2.1. Création et équipement d'un piézair.....	43
5.2.2. Mise en place d'ouvrages de prélèvements des gaz du sol à différentes profondeurs.....	47
5.3. OUVRAGES PERMANENTS – AIR SOUS DALLE	50
5.4. OUVRAGES TEMPORAIRES.....	53
5.4.1. Cannes gaz.....	53
5.4.2. Chambre à flux pour la caractérisation des transferts des gaz du sol.....	55
5.4.3. Technique du « Sub-slab » (air sous dalle)	56
5.5. PRÉPARATION DES OUVRAGES DE PRÉLÈVEMENT	57
5.5.1. Contrôle d'étanchéité	57
5.5.2. Étape de purge préalable au prélèvement	58
6. Protocoles de prélèvements et de mesures des gaz du sol et d'air intérieur	59
6.1. HYGIÈNE, SÉCURITÉ ET ENVIRONNEMENT	59
6.2. PRÉPARATION DE LA CAMPAGNE DE CARACTÉRISATION	59
6.3. MESURES PRÉLIMINAIRES.....	60
6.3.1. Matériel de mesure de gaz possible.....	60
6.3.2. Mesures d'orientation sur site	62
6.3.3. Mesures préalables aux prélèvements.....	62
6.3.4. Mesures en continu.....	64
6.4. LA CAMPAGNE DE PRÉLÈVEMENT	66
6.4.1. Sélection des types d'échantillonnage par rapport au contexte	66
6.4.2. Présentation des différents modes ou techniques de prélèvement.....	67
6.4.3. Durée de prélèvement	70
6.4.4. Protocoles de prélèvement actif sur tube à désorption (thermique ou chimique), sur filtre imprégné ou sur barboteur	71
6.4.5. Protocoles de prélèvement actif en sac d'échantillonnage	82

6.4.6. Protocoles de prélèvement actif par conteneurs en dépression (canister).....	82
6.4.7. Protocoles de prélèvement passif	84
6.5. PRÉCAUTIONS SPÉCIFIQUES DANS LE CAS DE PRÉLÈVEMENTS DE GAZ SOUS UN BÂTIMENT.....	94
7. Analyse et interprétation des résultats.....	95
7.1. RAPPORT D'ÉCHANTILLONNAGE ET FICHE DE PRÉLÈVEMENT	95
7.2. RÉFÉRENTIELS D'INTERPRÉTATION.....	97
7.2.1. Gaz du sol	97
7.2.2. Air intérieur	97
7.3. ASSURANCE QUALITÉ	99
7.4. IDENTIFICATION DES SOURCES D'INTERFÉRENCES.....	100
7.4.1. Remarque générale	100
7.4.2. Interférences potentielles liées aux prélèvements par conteneur sous dépression	100
7.4.3. Maîtrise des débits.....	101
7.4.4. Saturation / défauts d'adsorption des supports de prélèvements	102
7.4.5. Incertitude liée au prélèvement	103
7.4.6. Incertitude liée à l'analyse.....	103
7.4.7. Interférences liées aux pollutions domestiques	104
7.4.8. Variabilité temporelle	104
7.4.9. Volume d'échantillonnage des gaz du sol	104
7.4.10. Rayons d'influence et rayons de captage des prélèvements de gaz du sol.....	106
7.4.11. Risques de contamination	109
8. Conclusion.....	111
9. Références normatives et documents de référence	113
9.1. NORMES	114
9.2. GUIDES ET DOCUMENTS MÉTHODOLOGIQUES (LISTE NON EXHAUSTIVE)	114
10. Bibliographie	115

Liste des figures

Figure 1 – Comportement de polluants volatils dans les sols et les eaux souterraines	8
Figure 2 – Exemple de dynamique des gaz du sol au droit d'un bâtiment sans sous-sol ni vide sanitaire (d'après Johnson & Ettinger (1991))	10
Figure 3 – Exemple de transferts latéraux des gaz du sol vers l'air intérieur d'un sous-sol ou d'un vide sanitaire	11
Figure 4 – Exemple de transferts de composés volatils vers l'air intérieur d'un bâtiment via les tranchées et les réseaux.....	11
Figure 5 – Illustration schématique de l'influence de la pression atmosphérique sur la dépression des gaz du sol (inspiré d'observations réelles).....	13
Figure 6 – Exemple d'influence du tirage thermique modélisé sur le renouvellement d'air d'un bâti perméable (source [Fluxobat, 2013]).....	16
Figure 7 – Illustration des émissions gazeuses en zone source et des émissions gazeuses associées à un panache présent dans les eaux souterraines.....	21
Figure 8 – Exemples d'implantation d'ouvrages de prélèvement de gaz du sol au droit ou en bordure d'un bâtiment.....	23
Figure 9 – Schéma de principe des différentes configurations de caractérisation des gaz du sol ou de leur transfert.....	27
Figure 10 – Schéma illustrant la représentativité des échantillonnages en fonction de la durée de prélèvement	41
Figure 11 – Exemple d'implantation d'un piézair avec (a) une vanne étanche, (b) l'installation du tubage dans le puits foré, (c) l'étanchéité avec un coulis de bentonite, (d) le capot de protection	46
Figure 12 – Coupe schématique d'un piézair (unités en mm).....	46
Figure 13 – Types de piézairs pour des investigations à différentes profondeurs d'après [CITYCHLOR, 2013]	48
Figure 14 – Illustration de la mise en place d'obturateurs gonflables simples et annulaires (source : BRGM)	49
Figure 15 – Illustration d'un court-circuit entre deux zones crépinées insuffisamment espacées lors d'un pompage sur un piézair de type B (avec packer isolant les deux zones crépinées)	50
Figure 16 – Schéma de principe d'un Sub-Slab (source : US-EPA)	51
Figure 17 – Illustration des différents types de cannes gaz	53
Figure 18 – Exemple de canne gaz à pointe rétractable.....	54
Figure 19 – Illustrations de chambres à flux sur dalle béton ou sol à nu	56
Figure 20 – Illustration d'un test d'étanchéité au gaz traceur.....	58
Figure 21 – Capacité de piégeage comparée de l'eau à 21°C pour plusieurs types de supports de prélèvement d'air [INRS, 2000].....	64
Figure 22 – Terminologie employée autour des prélèvements	66
Figure 23 – Schéma de principe d'un prélèvement de gaz du sol (ligne simple avec 1 support de prélèvement)	71
Figure 24 – Exemples de supports de prélèvement saturés en eau (gel de silice imprégné DNPH en haut et charbon actif en bas)	73
Figure 25 – Illustrations de systèmes de répartition des flux	74

Figure 26 – Kit Constant Pressure Controller (CPC) – SKC [®]	76
Figure 27 – Schéma de principe d'un prélèvement de gaz du sol pour deux supports en parallèle avec emplacement des contrôles de débits à réaliser.....	78
Figure 28 – Illustration d'un conteneur sous dépression (canister 6 L (source : projet Citychlor)	83
Figure 29 – Schéma de principe d'échantillonneur passif radial et axial (source : ADEME 2016)	86
Figure 30 – Support "Radiello [®] " et son corps diffusif à diffusion radiale (source : d'après Sigma- Aldrich).....	87
Figure 31 – Tube passif conditionné par l'INERIS (tube acier inox et adsorbant Radiello [®] 145) (source : INERIS).....	90
Figure 32 – Module SPG 0008 [®] Amplified Geochemical Imaging LLC (source : INERIS)	90
Figure 33 – BeSure [®] Sampler de BEACON Environmental Services Inc (source : INERIS).....	92
Figure 34 – Illustration théorique de l'influence du volume de pompage des gaz du sol sur les résultats obtenus.....	105
Figure 35 – Méthode de calcul pour la détermination du rayon de captage cylindrique d'un ouvrage de prélèvement de gaz du sol (source : d'après [CITYCHLOR, 2013])	107
Figure 36 – Méthode de calcul pour la détermination du rayon de captage sphérique d'un ouvrage de prélèvement de gaz du sol	107

Liste des tableaux

Tableau 1 – Critères d’appréciation de la volatilité des produits organiques ([BRGM 2008] d’après Pellet, 1996).....	7
Tableau 2 – Évaluation qualitative de l’impact de certains paramètres sur le dégazage et/ou les contractions de composés volatils dans les sols et/ou l’air intérieur	18
Tableau 3 – Types de dispositifs couramment mis en œuvre en fonction de l’approche retenue20	
Tableau 4 – Recommandations concernant la profondeur de prélèvement pour différents types d’ouvrages et de prélèvements.....	25
Tableau 5 – Dimensionnement des mesures de concentrations dans l’air intérieur en fonction des objectifs (source [Fluxobat, 2013]).....	31
Tableau 6 – Méthodes d’analyse des gaz sur site d’après [ATTENA, 2013].....	61
Tableau 7 – Recommandations sur le choix des supports de prélèvement en fonction des contextes.....	66
Tableau 8 - Répartition des responsabilités entre le laboratoire et le préleveur pour l’analyse des gaz du sol et de l’air intérieur et extérieur.....	67
Tableau 9 - Principes de fonctionnement des types d’échantillonnage des gaz du sol et de l’air intérieur / extérieur les plus couramment mis en oeuvre.....	68
Tableau 10 – Types d’usage et de résultats pouvant être obtenus pour les différents supports de prélèvements	85
Tableau 11 – Rappel des recommandations pour l’interprétation des variations de débit de prélèvement	101
Tableau 12 – Estimations théoriques de rayons de captage cylindriques d’un ouvrage de prélèvement de gaz du sol dans des sols parfaitement homogènes	108
Tableau 13 – Estimations théoriques de rayons de captage sphérique d’un ouvrage de prélèvement de gaz du sol dans des sols parfaitement homogènes	108

Liste des annexes

- Annexe 1 Points clés à prendre en compte pour l'implantation d'ouvrages de prélèvement de gaz du sol
- Annexe 2 Points clés à réaliser ou à prendre en compte lors de la réalisation de prélèvements de gaz du sol
- Annexe 3 Check-list d'aide à la préparation de la campagne de mesures d'air intérieur
- Annexe 4 Questionnaire d'enquête préliminaire pour les prélèvements d'air intérieur:
« Renseignements sur le bâtiment, les activités intérieures, les conditions de mesures »
- Annexe 5 Exemple de fiche de prélèvement de gaz du sol
- Annexe 6 Exemple de fiche de prélèvement d'air intérieur / extérieur
- Annexe 7 Annexe informative : Sources potentielles de polluants de l'air intérieur (entrée par substance)
- Annexe 8 Exemples de montages constatés
- Annexe 9 Caractéristiques des principaux types d'adsorbants
- Annexe 10 Fiches descriptives des principales méthodes de prélèvement
- Annexe 11 Recommandations du groupe de travail laboratoires sur les supports de prélèvement et méthodes d'analyses adaptés aux principaux composés volatils
- Annexe 12 Valeurs guides françaises de qualité d'air intérieur (ANSES) et Valeurs repères d'aide à la gestion (HCSP)
- Annexe 13 Qualité – Vérifications et approbations du guide

Avant-propos

Dans le domaine des sites et sols pollués, et plus particulièrement dans le cadre d'études de type Interprétation de l'État des Milieux (IEM) ou Plan de Gestion (PG), la problématique de la présence de composés volatils dans les eaux souterraines et les sols est très étudiée car associée à des enjeux sanitaires importants. Leurs caractéristiques physico-chimiques, et plus particulièrement leur volatilité, favorisent leur transfert vers les gaz du sol, voire vers l'air intérieur (si un bâtiment est sus-jacent) ou l'air extérieur. En fonction des conclusions du schéma conceptuel, les matrices gaz du sol et air intérieur / extérieur peuvent alors faire l'objet de prélèvements afin de caractériser les transferts ou les expositions de cibles à ces composés. Ces prélèvements permettent notamment :

- de mettre en relation les composés mesurés dans l'air intérieur avec ceux mesurés dans les gaz du sol,
- de contribuer à localiser la (ou les) source(s) de pollution présente(s) dans les sols,
- de contribuer à localiser le (ou les) panache(s) de pollution présent(s) dans les eaux souterraines,
- de rendre compte de l'état de dégradation des milieux en réalisant leur caractérisation,
- d'évaluer les enjeux en fonction des usages et des fréquentations,
- de suivre les travaux de dépollution,
- de surveiller, à moyen ou à long terme, l'évolution de l'état du site.

Lorsque cette problématique est rencontrée, la réalisation de prélèvements de gaz du sol et/ou d'air intérieur/extérieur permet alors la compréhension des émissions et l'évaluation des impacts.

Un intérêt croissant est porté aux gaz du sol dans le domaine des sites et sols pollués, notamment en raison du caractère intégrateur de ce milieu vis-à-vis des pollutions par des composés volatils présents dans les sols et dans les eaux souterraines. Cependant, ce milieu est également complexe, et il est nécessaire de suivre certaines recommandations spécifiques quant à la réalisation des mesures, prélèvements et analyses, afin d'obtenir des résultats représentatifs.

La qualité de l'air intérieur présente également un intérêt tout particulier dans le cadre des études menées, puisqu'il s'agit d'un milieu d'exposition (voie d'inhalation).

De nombreux paramètres régissent la qualité de l'air intérieur. Les composés organiques volatils (COV) peuvent être émis depuis diverses sources dans l'air intérieur des bâtiments, en permanence ou par intermittence (ex : émissions de COV depuis le mobilier, les peintures...). Ce milieu complexe nécessite également de suivre certaines recommandations spécifiques, afin d'obtenir des résultats représentatifs et de discriminer les composés volatils provenant des gaz du sol.

Ce guide, réalisé par le BRGM et l'INERIS, présente les règles de l'art et les modalités d'échantillonnage des gaz du sol et d'air intérieur / extérieur dans un

contexte de pollution des sols et/ou des eaux souterraines, en cohérence avec la politique nationale des sites et sols pollués et les exigences de la norme NF X 31-620 (parties 1 à 4), et, plus particulièrement les prestations élémentaires A230 « Prélèvements, mesures, observations et/ou analyses sur les gaz du sol » et A240 « Prélèvements, mesures, observations et/ou analyses sur l'air ambiant et les poussières atmosphériques ».

Le présent guide expose par ailleurs des recommandations concernant notamment :

- la stratégie de prélèvement en fonction des objectifs visés,
- la préparation de la campagne de prélèvement,
- la réalisation d'ouvrages de prélèvement,
- les méthodes de prélèvement d'air,
- la réalisation de prélèvements de gaz du sol, d'air intérieur et d'air extérieur,
- l'interprétation des résultats.

1. Champ d'application du présent guide

1.1. CHAMP D'APPLICATION

Les prélèvements des gaz du sol et de l'air intérieur / extérieur sont fréquemment mis en œuvre dans le cas d'études réalisées sur des sites pollués par des substances volatiles.

Aussi, la connaissance et la maîtrise des règles de l'art en matière de prélèvements pour ces matrices présentent un intérêt particulièrement important dans le cadre de la démarche de gestion des sites et sols pollués (Interprétation de l'État des Milieux, Plan de Gestion, Analyse des Risques Résiduels).

Les objectifs des mesures réalisées dans l'air intérieur / extérieur ou dans les gaz du sol doivent être précisément définis avant le début de toute campagne de caractérisation, afin de savoir comment les interpréter, notamment en définissant les valeurs ou référentiels de comparaison. Il s'agira, en effet, de mettre en place les protocoles de prélèvement et d'analyses adaptés, afin de répondre aux objectifs des études.

Ce document est consacré uniquement à la caractérisation des gaz du sol, de l'air intérieur / extérieur en lien avec une pollution des sols et/ou des eaux souterraines et ne traite pas des (éventuelles) étapes amont telles que les investigations des sols et/ou des eaux souterraines ainsi que l'étude documentaire (historique du site, schéma conceptuel, etc.) pour lesquelles des guides et des outils spécifiques¹ sont disponibles.

Ce guide établit des recommandations pour :

- la mise en place d'ouvrages de prélèvements de gaz du sol,
- les protocoles de prélèvements (par aspiration mécanique / naturelle) des gaz du sol et d'air intérieur / extérieur, lorsqu'ils sont en lien avec une pollution des sols et/ou des eaux souterraines.

Dans ce guide, des références commerciales de matériels ou supports de prélèvements disponibles dans le commerce sont fournies. Ces informations sont données à titre indicatif pour faciliter la lecture et l'utilisation de ce guide et ne constituent aucunement un cautionnement de ces produits par le BRGM ou l'INERIS. Il est possible d'utiliser tout matériel ou produit présentant des performances équivalentes.

Le domaine d'application de ce guide concerne uniquement les gaz du sol, l'air intérieur / extérieur et n'intègre pas les composés particuliers, ni l'air des lieux de travail (soumis au code du travail).

¹ <http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Sites-et-sols-pollues-.html>

1.2. POPULATIONS, SUBSTANCES ET LIEUX CONCERNÉS

En cohérence avec la norme NF X 31-620-1 à 4 et avec la méthodologie nationale des sites et sols pollués, les moyens et méthodes indiqués dans ce rapport concernent exclusivement la caractérisation de substances chimiques gazeuses dans l'air intérieur / extérieur et dans les gaz du sol pour les populations générales, hors populations concernées par la réglementation en termes d'hygiène du travail. Sont exclus les substances chimiques particulières (poussières issues du sol), radioactives (radon et descendants), les biocontaminants, l'amiante, les allergènes, les acariens et les microorganismes (moisissures, ...).

Concernant l'air intérieur, les lieux concernés dans le cadre du présent document sont :

- les habitations ;
- les locaux recevant du public, dont les lieux scolaires et d'accueil de la petite enfance (crèches, haltes garderies, écoles maternelles, écoles primaires, collèges et lycées, centres de loisirs, etc.) ;
- les bureaux ;
- et tout autre lieu entrant dans la démarche d'évaluation de qualité de l'air intérieur en lien avec la méthodologie de gestion de sites et sols pollués (notamment requalification d'ateliers industriels).

Ce document concerne la population générale ou celle fréquentant les Établissements Recevant du Public (ERP). La protection des travailleurs répondant à un cadre réglementaire qui lui est propre [INRS, 2012] n'est pas développée dans ce guide sauf lorsque les substances sont historiquement présentes dans les sols et ne sont plus utilisées par la nouvelle activité.

Il est à noter que, dans le cadre d'une réhabilitation d'un site pour un usage industriel ou un usage tertiaire, les futurs travailleurs sont considérés comme une population générale. Ainsi, l'évaluation des risques résiduels, lorsqu'elle est requise, se base sur les Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR) définies pour la population générale et non pas sur les Valeurs Limites d'Exposition Professionnelles (VLEP).

En raison de la diversité des sources de contamination autres que celles liées aux émissions depuis le sol et/ou la nappe, la composition chimique de l'air peut être extrêmement variable d'un lieu à l'autre. Ainsi, est également abordée la caractérisation de la qualité de l'air intérieur de l'environnement local témoin, hors influence de l'impact potentiel des émissions de substances volatiles issues du sol et/ou de la nappe.

2. Rappel sur le comportement des polluants volatils dans les gaz du sol et l'air intérieur / extérieur

Cette partie n'a pas pour vocation de présenter l'ensemble des composantes et principes liés au comportement des polluants volatils ni à la dynamique de ces polluants dans les gaz du sol, l'air intérieur / extérieur mais plutôt de citer les principaux éléments susceptibles d'avoir une influence sur les prélèvements réalisés dans le cadre d'investigations de terrain.

Il est précisé que l'hétérogénéité des sols et des pollutions peut engendrer des variations locales importantes des échanges NAPL² / air, NAPL / eau et eau / air. Les phénomènes cités ci-après, ainsi que leurs interactions, peuvent être soumis à des variations liées à ces hétérogénéités et faire varier les concentrations de plusieurs ordres de grandeur.

Le « Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes » [BRGM, 2008] présente dans le détail les paramètres pris en compte pour la détermination de la volatilité des composés et leur comportement dans les sols et dans les eaux.

2.1. ORIGINES POSSIBLES DES COMPOSÉS VOLATILS DANS LES GAZ DU SOL, L'AIR INTÉRIEUR / EXTÉRIEUR

Le schéma conceptuel, tel que décrit dans le guide « Schéma conceptuel et modèle de fonctionnement » [MEDAD, 2007] et dans la norme NF X 31-620, permet de préciser les relations entre les sources de pollution, les différents milieux de transfert et les enjeux à protéger.

En contexte de sites et sols pollués, les concentrations en composés volatils dans les gaz du sol et dans l'air intérieur / extérieur peuvent provenir de composés volatils présents :

- **dans les sols** : des composés gazeux peuvent être présents dans les sols suite à une pollution accidentelle ou historique des sols (par des produits, des déchets enfouis...). Ces composés présents dans les sols sont susceptibles de se volatiliser et de transiter depuis les sols jusque dans les gaz du sol puis vers l'air intérieur et/ou extérieur ;
- **dans les eaux souterraines** : des composés gazeux peuvent être présents dans les eaux souterraines suite à une pollution accidentelle ou historique des eaux souterraines. Ces composés présents dans les eaux souterraines sont susceptibles de se volatiliser et de transiter depuis les eaux souterraines jusque dans les gaz du sol puis vers l'air intérieur et/ou extérieur.

² Non Aqueous Phase Liquid : produits purs en phase huileuse

Composés volatils secondaires (métabolites) :

Des dégazages de composés volatils secondaires (métabolites) peuvent se produire depuis la nappe phréatique ou un sol pollué :

- la présence potentielle de métabolites doit être prise en compte dès les premières étapes du diagnostic ;
- dans certains contextes, des métabolites peuvent être engendrés lors de la dégradation de composés (molécules mères). Ces métabolites peuvent avoir des propriétés physico-chimiques et donc des comportements différents des molécules d'origine et ainsi être plus volatils, plus solubles et/ou plus toxiques (par exemple : le chlorure de vinyle est l'un des produits de dégradation possibles du tétrachloroéthylène et du trichloroéthylène et est plus volatil et plus toxique que les composés primaires.)

D'autres phénomènes peuvent, dans certaines conditions, influencer la qualité des gaz du sol. C'est par exemple le cas de la production de gaz issus de l'activité biologique au sein d'un environnement pollué par des substances biodégradables (produits ultimes, minéralisation) : CH₄, CO₂, CO et H₂S ou encore dans certains cas très particuliers des composés inorganiques comme le cyanure d'hydrogène (HCN) et de métaux sous forme gazeuse (mercure, méthylmercure, arsine (trihydure d'arsenic), plomb tétraéthyle) peuvent être présents dans les gaz du sol.

La caractérisation de composés volatils dans l'air intérieur peut être influencée par :

- des activités co-contributrices (activités des populations telles que bricolage, tabagisme, etc.),
- des pollutions autres que celle investiguée entraînant l'émission des mêmes composés volatils,
- des substances compétitrices vis-à-vis de la technique de prélèvement choisie,
- la présence potentielle d'autres sources de contamination comme les matériaux, les revêtements intérieurs, le mobilier, la décoration.

De plus, certaines voies de transfert préférentielles sont à prendre en compte pour l'évaluation du transfert des gaz du sol vers l'air intérieur avec notamment les passages de réseaux au travers des dalles, les cages d'ascenseur, les cheminées, la typologie de construction des fondations et la présence de racines (cf. chapitre 4).

2.2. COMPORTEMENT DES POLLUANTS

Le comportement des polluants dans les sols et les eaux souterraines est lié en partie à leurs propriétés physico-chimiques. La volatilité intrinsèque des composés dépend de leurs propriétés physico-chimiques et notamment des propriétés présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1 – Critères d'appréciation de la volatilité des produits organiques ([BRGM 2008]
d'après Pellet, 1996)

Paramètre	Symbole	Unité	Critères (à 20 – 25°C)	Interprétation
• Pression de vapeur	P_v	[Pa]	$P_v < 133$ $P_v \geq 133$	\Rightarrow non volatil \Rightarrow volatil
• Point d'ébullition	T_e	[°C]	$T_e < 80$ $80 \leq T_e < 200$ $T_e \geq 200$	\Rightarrow très volatil \Rightarrow volatil \Rightarrow faiblement volatil
• Constante de Henry	k_H	[Pa.m ³ / mol]	$k_H < 100$ $100 \leq k_H < 500$ $k_H \geq 500$	\Rightarrow faiblement volatil \Rightarrow volatil \Rightarrow très volatil

La volatilité d'un composé influe sur la manière dont il migre dans les sols, dont il s'en libère par volatilisation naturelle ou sur la façon dont il peut en être éliminé lors des opérations de dépollution. Cette propriété est importante pour le choix d'une technique de dépollution tant pour la zone saturée que pour la zone non saturée. La volatilité d'un composé constitue un paramètre important de l'évaluation des expositions sur des sites pollués par des composés volatils.

Les concentrations dans les gaz du sol résultent d'un équilibre entre les différentes phases présentes dans les milieux :

- **équilibre air/ NAPL (Non Aqueous Phase Liquid : produits pur en phase huileuse) : pression de vapeur (loi de Raoult)**
 - la volatilité d'un composé organique est définie par sa pression de vapeur à 20 °C ;
 - la pression de vapeur est la pression partielle d'un composé dans la phase gazeuse, en équilibre avec le solide pur ou le liquide pur. Elle est fonction de la température et s'exprime en Pascal (Pa). Il existe une relation entre la pression de vapeur et le point d'ébullition d'un composé organique : plus sa pression de vapeur est faible, plus son point d'ébullition est élevé ;
 - les pressions de vapeur n'étant connues que pour un nombre limité de composés, la classification de volatilité s'effectue pour des raisons pratiques, sur la base de points d'ébullition des composés à une pression de 1 013 hPa ;
 - des composés ayant une pression de vapeur supérieure à 133 Pa seront généralement considérés comme volatils [BRGM 2008].

Remarque

Certains composés ayant des pressions de vapeur inférieures à 133 Pa peuvent être considérés comme semi-volatils.

- **équilibre NAPL/eau : solubilité³**
 - la solubilité définit la masse maximale de soluté susceptible d'entrer en solution par unité de volume de solvant à une température donnée ;
 - la solubilité s'exprime en mg/L et est donnée à une température donnée ;
- **équilibre air/eau : loi de Henry**
 - la loi de Henry définit la volatilité d'un composé en considérant l'équilibre phase gazeuse / phase aqueuse. La (pseudo) constante de Henry (K_H) dépend de la température, de la pression et du chimisme de l'eau ;
 - la constante de Henry s'exprime sans unité ou en $\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{mol}$. Elle rend compte de l'équilibre des concentrations d'un composé donné entre sa phase aqueuse et sa phase vapeur ;
 - la constante de Henry augmente avec la température ;

La Figure 1 présente un exemple de volatilisation de composés organiques volatils depuis les sols et les eaux souterraines.

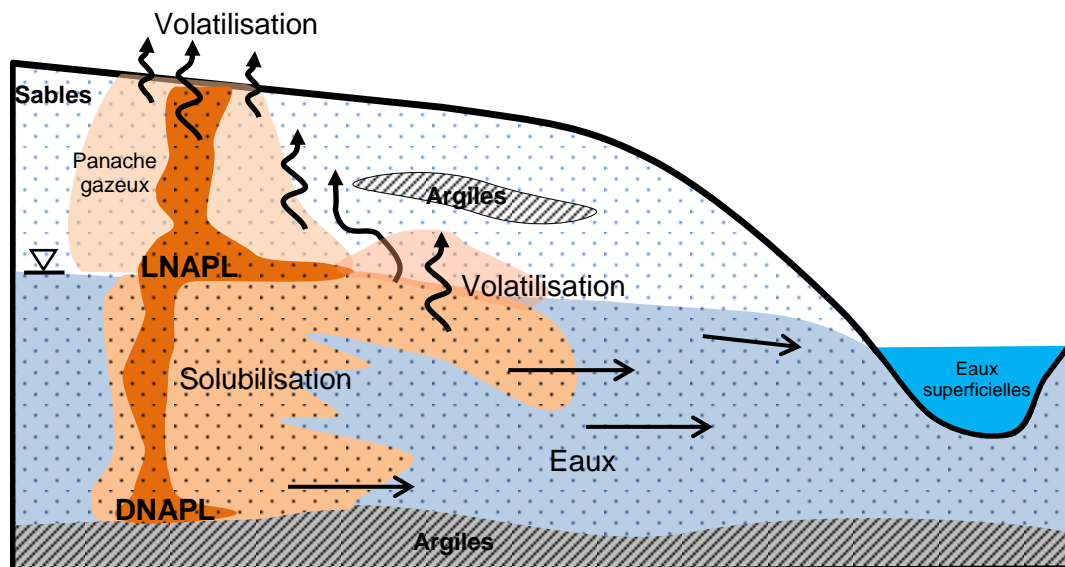


Figure 1 – Comportement de polluants volatils dans les sols et les eaux souterraines

2.3. DYNAMIQUE DES GAZ DU SOL DANS LA ZONE NON SATURÉE VERS L'AIR INTÉRIEUR / EXTÉRIEUR

Les composés volatils ne sont pas statiques dans le milieu souterrain et sont soumis à plusieurs mécanismes.

³ La solubilité est mentionnée ici car elle entraîne la migration de composés présents dans les sols vers les eaux permettant ainsi leur volatilisation à partir des eaux.

Ces phénomènes sont :

- **la diffusion** : selon les gradients de concentration (« loi de Fick »). Ce phénomène est 10 000 à 100 000 fois plus rapide pour une molécule donnée dans les gaz que dans les eaux et est d'ailleurs prépondérant en milieu peu perméable et à proximité des zones sources ;
- **la convection** : sous l'effet de gradients de pression. C'est le principal moteur des déplacements de masses de gaz au sein de la zone non saturée en particulier dans les milieux poreux et perméables à l'air (sables et graviers,...) ;
- **la sorption/désorption et la biodégradation** : ces phénomènes sont moins importants pour les composés volatils dans la zone non saturée que dans la zone saturée.

La migration de composés volatils en phase vapeur dans les gaz du sol est essentiellement mue par les phénomènes de diffusion et/ou convection. Le transfert de ces composés en phase vapeur est, tout comme pour l'eau en zone saturée, contrôlé par la distribution spatiale des perméabilités à l'air. Des hétérogénéités et anisotropies de ces perméabilités peuvent être à l'origine de cheminements préférentiels des vapeurs dans le sol. La perméabilité à l'air dépend essentiellement de la structure du milieu poreux (perméabilité intrinsèque) et de la teneur en eau du milieu.

Le Tableau 2, en page 18, présente une évaluation qualitative de l'impact de certains paramètres sur le dégazage et/ou les contractions de composés volatils dans les sols et/ou l'air intérieur

2.3.1. Transfert des composés volatils depuis les gaz du sol vers l'air intérieur / extérieur

Le transfert des composés volatils depuis les gaz du sol vers l'air intérieur / extérieur est plus ou moins important en fonction de la perméabilité à l'air des sols, de la perméabilité à l'air des fondations des bâtiments et de leur capacité diffusive jusque vers l'air intérieur au travers de points de transfert (traversées de dalle par des réseaux divers, joints de dilatation des dalles, arrivées de tranchées de canalisation associées ou non à des trappes d'accès, des trous, ...) ou par l'intérieur des canalisations elles-mêmes (réseau d'eaux usées, gaines, ...).

Le transfert à travers la dalle et à proximité immédiate ou au droit des fondations est le résultat d'un phénomène de convection des gaz du sol et également d'un phénomène de diffusion gazeuse (cf. Figure 2) en tenant compte des spécificités liées aux soubassements, au type de béton employé ainsi qu'à la pénétration des réseaux, des fissures et aux caractéristiques des sols.

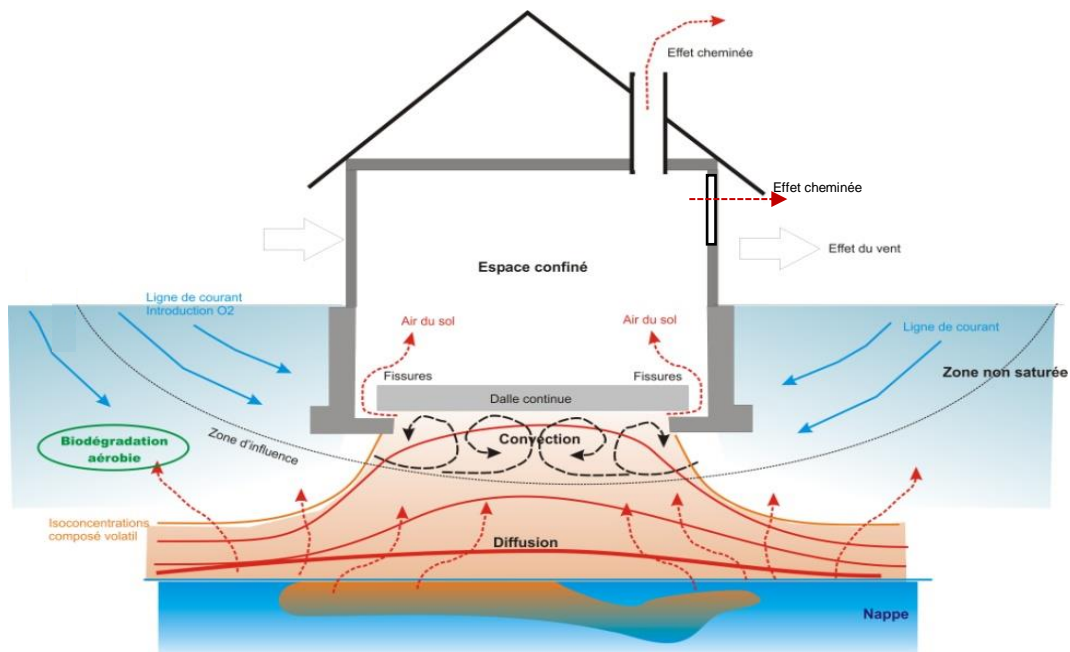


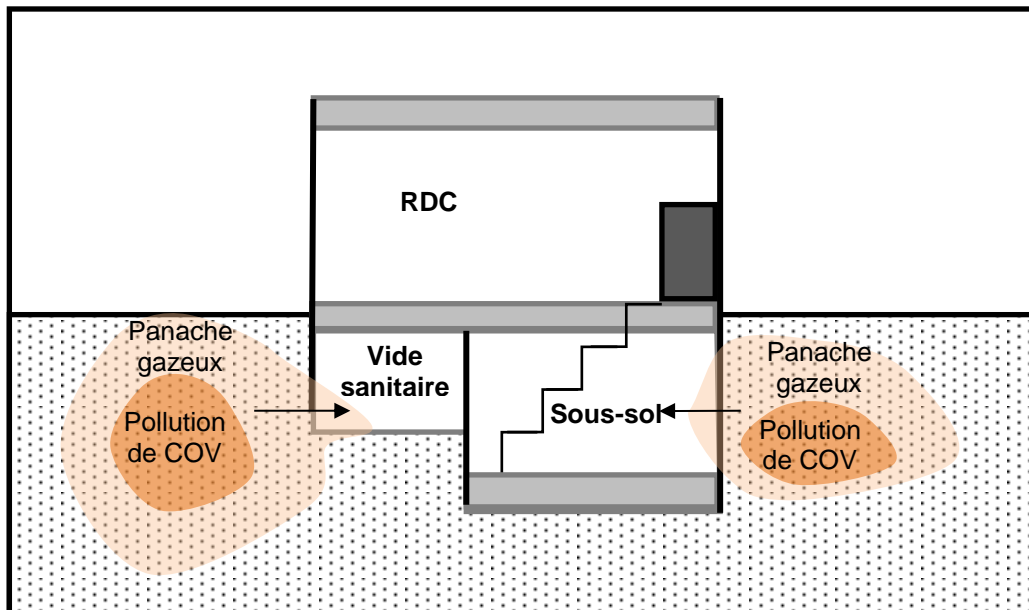
Figure 2 – Exemple de dynamique des gaz du sol au droit d'un bâtiment sans sous-sol ni vide sanitaire (d'après Johnson & Ettinger (1991))

Le phénomène de convection est créé par la différence de pression (quelques Pascals) qui existe entre le sol et l'intérieur du bâtiment et qui entraîne un mouvement d'air depuis le sol vers le bâtiment via le soubassement. La différence de pression est essentiellement liée aux systèmes de ventilation et de chauffage ainsi qu'à l'impact du vent sur le bâtiment. Le système de chauffage induit notamment une différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment (phénomène de tirage thermique également appelé « effet cheminée »). Le flux convectif est généralement plus important durant l'hiver.

Remarques (par ordre décroissant d'influence supposée) :

- Les réseaux enterrés (gaines, réseaux d'eau potable, d'eaux usées ...) ainsi que leurs tranchées généralement remplies de sablons. Les racines des arbres peuvent également jouer le rôle de massif drainant pour les gaz du sol et de vecteurs préférentiels des vapeurs depuis les sols vers l'air intérieur d'un bâtiment ;
- Le tirage thermique est moins important en période chaude (arrêt des chauffages, ouverture plus fréquente des fenêtres...) entraînant une moins grande dépression sous les bâtiments ;
- Le phénomène de diffusion peut avoir lieu dans les sols et aussi dans la dalle considérée comme un milieu poreux ou à travers des fissures ;
- Les phénomènes de diffusion et de convection des gaz du sol peuvent se produire à travers le plancher d'un bâtiment (cf. Figure 2), mais également à travers les murs des sous-sols ou des vides sanitaires, notamment en cas de panache de composés volatils situé latéralement à un sous-sol (cf. Figure 3) ;
- Les champs de pression autour et sous le bâtiment peuvent ne pas être stables car ils sont influencés par les variations de pression atmosphérique, l'impact du vent sur le sol et le bâtiment ainsi que les conditions du tirage thermique et du renouvellement de l'air intérieur ;

- Les volumes situés sous les pièces de vie comme des vides sanitaires, les caves ou les parkings constituent une protection pour ces dernières en diluant les composés volatils avant qu'ils n'entrent dans les zones de vie (à condition d'avoir une aération ou une ventilation efficaces) ;
- Le cuvelage parfois mis en œuvre au niveau des parkings pour les rendre étanches à l'eau n'est pas forcément étanche aux vapeurs ;
- La présence d'appareil à combustion raccordé à foyer ouvert (cheminée, chaudière, ...) contribue à accentuer la dépression du bâtiment.



—> : Transfert de polluants volatils

Figure 3 – Exemple de transferts latéraux des gaz du sol vers l'air intérieur d'un sous-sol ou d'un vide sanitaire

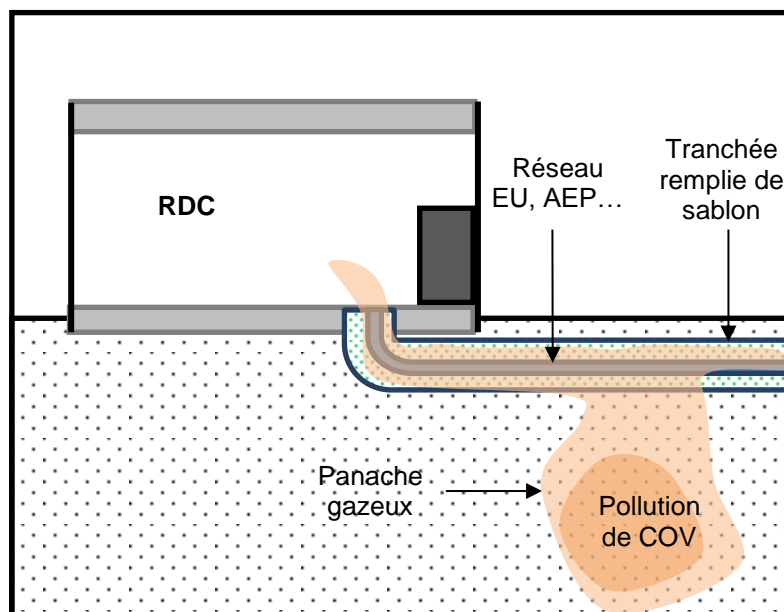


Figure 4 – Exemple de transferts de composés volatils vers l'air intérieur d'un bâtiment via les tranchées et les réseaux

2.3.2. Facteurs environnementaux impactant le transfert des gaz du sol vers l'air intérieur et l'air extérieur

Les paramètres environnementaux suivants peuvent engendrer des conditions majorantes ou minorantes pour l'émission de composés gazeux depuis les gaz du sol vers l'air intérieur et/ou extérieur et doivent donc être évalués et/ou mesurés, pendant le prélèvement mais également, pour certains, les jours précédant les investigations. Ci-dessous sont présentées les tendances principales liées à ces facteurs environnementaux (par ordre indicatif d'importance). Il est à préciser que dans certains contextes particuliers, des écarts par rapport à ces tendances peuvent être observés (comme par exemple des sols très argileux qui peuvent avoir tendance à minimiser les effets de la pression atmosphérique et la profondeur impactée par cette pression) :

- **La pression atmosphérique** peut modifier la convection des gaz du sol vers l'atmosphère ou l'intérieur d'un bâtiment. L'arrivée d'une période anticyclonique (pression supérieure à 1 013 hPa) génère par exemple une entrée d'air atmosphérique dans le sol de sub-surface tandis que l'arrivée d'une période dépressionnaire (inférieure à 1 013 hPa) ou une diminution rapide de la pression atmosphérique impliquent un transfert plus important des gaz du sol vers l'air atmosphérique.

Le temps nécessaire à l'équilibrage des pressions entre l'atmosphère et les sols dépend des caractéristiques du sol et de leur éventuelle couverture. La durée de rééquilibrage est de l'ordre de quelques heures à quelques jours pour des sols moins perméables et/ou plus profonds. Ainsi les variations de pressions atmosphériques (notamment basées sur l'alternance jour / nuit et l'alternance de cycles dépressionnaires et anticycloniques) se traduisent avec un temps de retard de plus en plus important avec la profondeur et avec l'imperméabilité des sols. Cet effet de retard engendre une cyclicité des variations de pression dans les gaz du sol plus lente que celle des pressions atmosphériques.

Pour illustrer cette influence, la Figure 5 présente l'évolution schématique de la pression dans des piézais situés à faible profondeur (par exemple 1 m de profondeur) et à profondeur plus importante (par exemple 3 m de profondeur) en lien avec la pression atmosphérique sur une période de 6 jours. Cette figure schématique, basée sur un retour d'expérience d'un site réel, présente des illustrations de mécanismes de variations de pression. Les différences de pression varient en fonction des sites, des périodes, de la nature des sols...

Sur cette figure on peut observer :

- **La pression atmosphérique** : variations journalières (cyclicité d'environ 24h) basées notamment sur l'alternance jour / nuit ;
- **La pression des gaz du sol à faible profondeur** : variation liée à la pression atmosphérique mais avec une cyclicité plus longue d'environ 48h ;
- **La pression des gaz du sol profonds** : variation très lente avec une cyclicité de plusieurs jours.

Ainsi, on peut observer des périodes où les gaz du sol sont en surpression par rapport à la pression atmosphérique, et inversement.

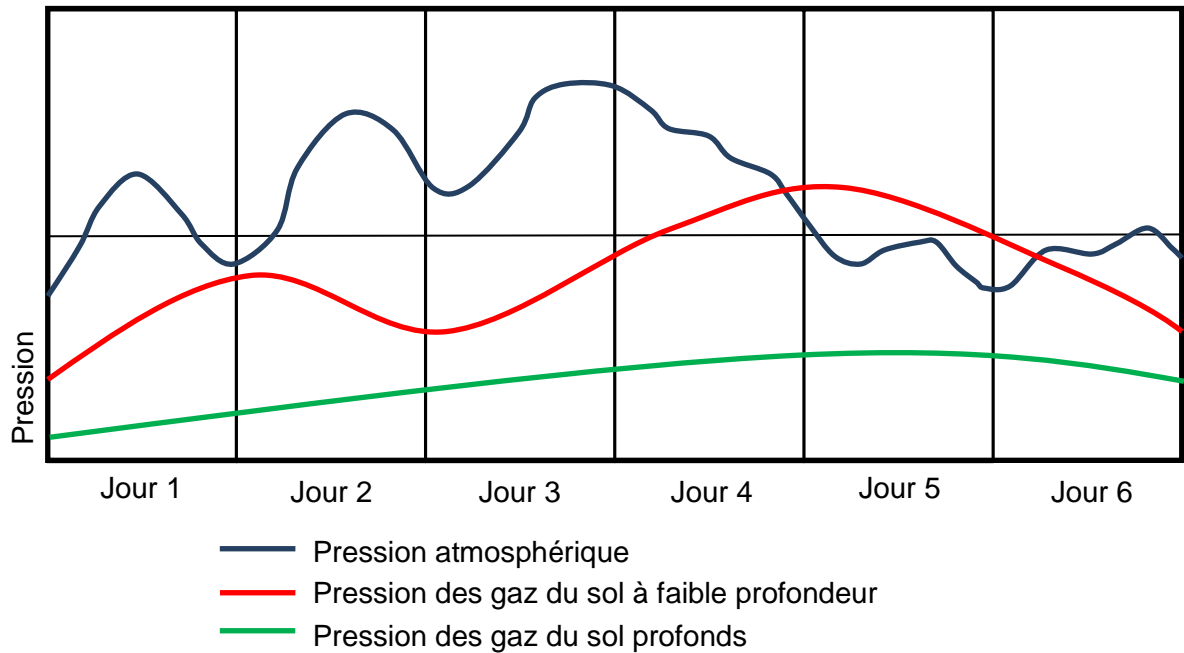


Figure 5 – Illustration schématisée de l'influence de la pression atmosphérique sur la dépression des gaz du sol (inspiré d'observations réelles)

- **Les précipitations** : la pluie peut influencer le taux d'humidité, mais aussi les transferts de substances chimiques volatiles.

- ***Influence de la pluviométrie sur les transferts***

En l'absence de bâtiment ou d'un revêtement de sol (enrobé, béton...) la pluie a une influence directe sur la teneur en eau du sol. Le transport des substances chimiques volatiles au sein du sol vers la surface peut en être affecté avec notamment la modification de la diffusion effective et la perméabilité au gaz. La pluie peut ainsi induire une augmentation des flux vers l'air intérieur si la source de pollution se situe sous le bâtiment [MADEP, 2002] et [Fluxobat, 2013].

- ***Influence de la pluviométrie sur la saturation des sols en eau***

La pluie a également une influence sur le taux d'humidité des gaz du sol et l'air intérieur / extérieur dont l'augmentation peut présenter une contrainte vis-à-vis du choix des supports de prélèvement. De plus, la capacité du milieu à laisser s'écouler l'air dépend étroitement de la teneur en eau (saturation du milieu en eau) qui dépend de la perméabilité relative de l'air, de la granulométrie du sol et des précipitations.

▪ **Influence de saturation des sols en eau sur les prélèvements**

En cas de saturation du sol en eau, la perméabilité des sols à l'air sera réduite et le pompage des gaz du sol pourra s'avérer en raison d'une augmentation des pertes de charges qui peuvent aller jusqu'à une mise en défaut des pompes.

- **La variation (hausse ou baisse) rapide du niveau statique des eaux souterraines** peut générer une surpression ou une dépression de l'air des sols par rapport à la pression atmosphérique⁴ et ainsi conduire à un flux convectif des gaz (effet « piston »). Notamment dans le cas de variations brusques (pompages, épisodes de pluies, influence des marées). Ce phénomène est à associer aux caractéristiques hydrodynamiques des sols (perméabilité et porosité à l'air).
- En cas de **gel des horizons les plus superficiels** des sols, le dégazage des composés gazeux présents dans les sols est fortement diminué. Les substances chimiques volatiles peuvent alors être confinées dans les gaz de sol sous l'horizon gelé et migrer plus favorablement vers les zones bâties [MADEP, 2002]. La profondeur minimum hors gel d'un terrain varie selon la nature du sol, le climat et l'altitude. Il est généralement considéré que les sols situés au-delà de 1 mètre de profondeur sont hors gel.
- **Le vent** : en fonction de son intensité et de sa direction, le vent peut augmenter la mise en dépression d'un bâtiment ou de sols de sub-surface vis-à-vis de la pression des gaz du sol et donc favoriser le transfert de vapeurs vers l'air intérieur ou extérieur. Les différences de pression liées à ce phénomène demeurent en majorité faible (inférieures à quelques Pascals [Fluxobat, 2013]).
- **Les variations de température dans l'air et dans les sols** peuvent influencer le transfert des substances chimiques volatiles de différentes manières. En plus de l'influence de la température sur les paramètres élémentaires (pression de vapeur saturante, coefficients de diffusion, viscosité, perméabilité des sols...), les variations thermiques saisonnières ou diurnes induisent également des mouvements de convection en raison des variations de masse volumique du mélange gazeux.

La température des gaz du sol peut être différemment influencée par la température de l'air atmosphérique, en fonction de la nature des sols et de leur recouvrement (sols à nu, présence d'un bâtiment...).

2.3.3. Caractéristiques des bâtiments impactant le transfert des gaz du sol vers l'air intérieur

Les dispositions constructives suivantes peuvent engendrer des conditions majorantes ou minorantes pour l'émission de composés gazeux depuis les gaz du sol vers l'air intérieur et doivent donc être évaluées et/ou mesurées, pendant

⁴ Par exemple, une remontée de 1 m du niveau de la nappe sur une durée de 3 mois (initialement située à une profondeur de 5 m) correspond à une surpression des gaz du sol de 0,25 atm évacuée sur 3 mois, soit 280 Pa/J ($0,25 * 1,013 * 10^5 \text{ Pa} / 90 \text{ jours}$), à comparer à 1 000 Pa/J (ou 10 mbar/J) pour une variation barométrique rapide en Europe [Wiedersich, 1996] p 111-113

le prélèvement mais également, pour certains, sur les jours précédents. Ci-dessous sont présentées les tendances principales liées à ces dispositions constructives. Dans certains contextes particuliers, des écarts par rapport à ces tendances peuvent être observés :

- **Les conditions de ventilation et de renouvellement d'air à l'intérieur des bâtiments :**

La ventilation des pièces d'un bâtiment aura un effet sur l'accumulation des vapeurs.

L'aération naturelle par le biais de l'ouverture des fenêtres et autres entrées d'air augmente le renouvellement de l'air intérieur et permet de mieux répartir les concentrations en polluants. L'efficacité de l'aération naturelle n'est pas prévisible car elle est fortement dépendante des conditions climatiques et des pratiques des usagers du bâtiment.

Outre la ventilation naturelle, différents types de Ventilation Mécanique Contrôlée (VMC) existent [BRGM, 2014] :

- VMC simple flux par extraction :

Ce dispositif consiste à extraire mécaniquement l'air du bâtiment et à laisser rentrer l'air extérieur dans les pièces par de petites arrivées d'air situées dans les fenêtres ou par des entrées d'air créées dans les murs. Ce type d'installation peut engendrer une dépression à l'intérieur du bâtiment, vis-à-vis de la pression des gaz du sol, et ainsi favoriser le transfert de vapeurs vers l'air intérieur.

- VMC simple flux par insufflation :

Ce dispositif consiste à insuffler mécaniquement de l'air frais dans des locaux de manière à créer une légère surpression. Cette pratique peut conduire à limiter l'entrée du polluant dans les pièces.

- VMC double flux :

Ce dispositif consiste à insuffler mécaniquement de l'air extérieur en extrayant simultanément l'air intérieur des bâtiments. Un échangeur thermique permet de contrôler la température de l'air insufflé. Il est possible de régler une VMC double flux afin que le débit d'air insufflé soit supérieur au débit extrait, ce qui permet de mettre le logement en légère surpression et ainsi limiter l'entrée du polluant dans le bâtiment.

- **Les conditions de température à l'extérieur et à l'intérieur des bâtiments** peuvent influencer la volatilité des composés. De même, une température intérieure supérieure à la température extérieure (configuration du chauffage des bâtiments en hiver) peut créer un effet cheminée (appelé également « tirage thermique ») et ainsi engendrer une dépression du bâtiment vis-à-vis de la pression des gaz du sol, et donc favoriser le transfert de vapeurs vers l'air intérieur principalement par convection.

Le programme [Fluxobat, 2013] a permis de mettre en évidence sur son site atelier (Figure 6) que « pour des différences de température supérieures à 5°C, une droite se dessine clairement, permettant de relier une différence de température à un niveau de renouvellement d'air. Pour

les différences de température inférieures à 5°C, la relation entre le tirage thermique et le renouvellement d'air devient moins nette. En effet, lorsque le tirage thermique devient faible, l'effet du vent (même inférieur à 1 m/s) n'est plus négligeable. L'influence du vent et du tirage thermique sur les concentrations dans l'air intérieur ne peuvent être évaluées a priori, elles sont dépendantes de la perméabilité du bâtiment et de la propagation de la différence de pression à travers la dalle. » Le programme présente ces résultats obtenus à partir de modélisations conduites sur un bâti perméable et précise que les éléments présentés « ne peuvent être transposés à d'autres situations. ».

- **Présence d'un sous-sol ou d'un vide sanitaire :**

La présence d'un sous-sol ou d'un vide sanitaire sous un bâtiment a une influence sur le transfert et la migration de composés volatils issus des gaz du sol vers l'air intérieur du bâtiment. Les principales tendances associées à ces dispositions constructives sont les suivantes :

- La présence d'un sous-sol ou d'un vide sanitaire ventilé sous un bâtiment constitue généralement une barrière de dilution ;
- La présence de pièces enterrées ou semi enterrées augmente la surface de pénétration de vapeurs dans le bâtiment, par rapport à un bâtiment de plain-pied ;
- La présence de murs poreux ou de sol en terre battue facilite l'intrusion de vapeurs dans le bâtiment.

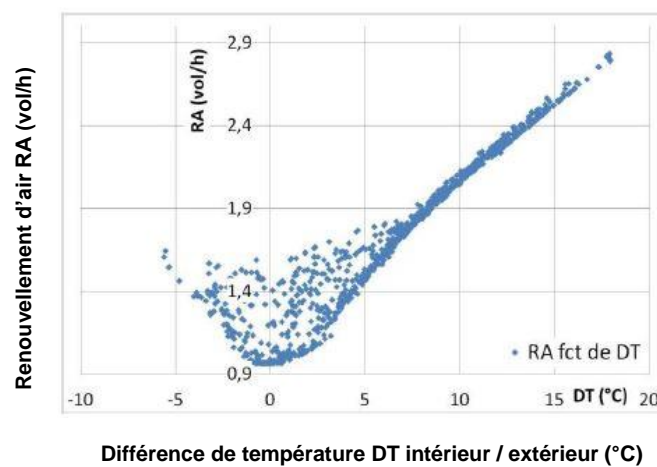


Figure 6 – Exemple d'influence du tirage thermique modélisé sur le renouvellement d'air d'un bâti perméable (source [Fluxobat, 2013])

Ces tendances seront plus ou moins importantes en fonction de la nature des types de revêtements (dalles bétons, terre battue...), du niveau de ventilation (ventilation mécanique, naturelle...) et des niveaux d'étanchéité entre les différents niveaux des bâtiments (portes coupes feu, passages de réseaux et canalisations....).

Il est à noter que le « Guide relatif aux mesures constructives utilisables dans le domaine des SSP » [BRGM, 2014] développe les principales mesures constructives pouvant être mises en œuvre lors de problématiques liées aux remontées de gaz de sols en provenance de la

sub-surface, à la perméation de composés volatils au travers d'une canalisation, à la pollution des sols de surface et la corrosion de biens matériels.

2.3.4. Synthèse des phénomènes de transfert des gaz du sol

Le Tableau 2 présente une synthèse des impacts de certains paramètres sur le dégazage de composés volatils dans les sols. Les impacts indiqués sont uniquement qualitatifs (minimisation / majoration) et non quantitatifs. Ces effets peuvent se cumuler mais également s'opposer et l'importance de chaque paramètre est susceptible de varier d'un site à l'autre.

Tableau 2 – Évaluation qualitative de l'impact de certains paramètres sur le dégazage et/ou les contractions de composés volatils dans les sols et/ou l'air intérieur

Paramètres	Détails	Impact	Remarques		
Paramètres environnementaux					
Température des gaz du sol (ordres de grandeur indicatifs ⁵)	<4°C	-	Diminution de la volatilité des composés		
	4-10°C	=	Conditions moyennes		
	>10°C	+	Augmentation de la volatilité des composés		
Pression atmosphérique	< 1 013 hPa	+	Conditions dépressionnaires		
	> 1 013 hPa	-	Conditions anticycloniques		
Variations de pression atmosphérique	Diminution rapide de la pression atmosphérique	+	Déséquilibre entre la pression atmosphérique et les gaz du sol		
	Augmentation rapide de la pression atmosphérique	-			
Vent	Absence de vent ou vent faible	=	-		
	Bourrasques de vent sur bâtiment	+	Augmentation de la dépression du bâtiment et des gaz du sol		
	Bourrasques de vent sur sols	+			
Variation du niveau des eaux souterraines	Variation lente des niveaux d'eaux souterraines (battements inter-saisonniers)	=	-		
	Augmentation rapide du niveau des eaux souterraines (influence du marnage, arrêt d'un pompage d'eaux souterraines)	+	Effet piston entraînant une surpression des gaz du sol		
	Diminution rapide du niveau des eaux souterraines (influence du marnage, mise en route d'un pompage d'eaux souterraines...)	-	Effet piston entraînant une mise en dépression des gaz du sol		
Pluviométrie	Précipitations autour d'un bâtiment	+	Augmentation potentielle des flux vers l'air intérieur si la pollution est en dessous du bâtiment (modification de la géométrie des panaches gazeux)		
	Précipitations sur des sols non imperméabilisés	-	Écoulement et transport des composés gazeux dans les sols		
Gel des sols de surface	Sols gelés en surface (0 – 1 m) sur des sols non imperméabilisés	-	Blocage du transfert des composés volatils et diminution de la volatilité dans (horizon 0-1 m)		
	Sols gelé en surface (0-1m) autour d'un bâtiment	+	Augmentation potentielle des flux vers l'air intérieur si la pollution est en dessous du bâtiment (modification de la géométrie des panaches gazeux)		
Perméabilité des sols	Sols perméables	+	Sables et graviers		
	Sols peu perméables	-	Argiles, limons		
Dispositions constructives					
Chauffage des bâtiments	Chauffage des bâtiments en condition hivernale	+	Effet de tirage thermique		
	Appareil à combustion raccordé à foyer ouvert (cheminée, chaudière),...	+	Augmentation de la mise en dépression du bâtiment		
Compaction des sols	Sols compacts	-	Espace inter-pores faible		
	Sols meubles	+	Espace inter-pores plus grand		
État des dalles béton (bâtiment)	Dalle en bon état	-	Dalles en bon état constituant un obstacle pour les gaz du sol		
	Dalle fissurée	+	Travaux, fissures de retrait en périphérie des dalles béton, action du gel		
Présence de voies de circulation préférentielle des gaz	Passage de réseaux, gaines... à travers les dalles et les revêtements des bâtiments. Intérieur des réseaux eux-mêmes (réseau d'eaux usées, gaines, canalisations...)	+	Modification des flux de circulation d'air		
Ventilation et renouvellement d'air	Portes et fenêtres fréquemment ouvertes	-	Diminution du tirage thermique et dilution des concentrations dans le bâtiment avec l'air extérieur		
	Aération naturelle	=	+	Renouvellement d'air imprévisible, mise en dépression du bâtiment en cas d'aération naturelle insuffisante	
	VMC double flux	+	=	-	Mise en équilibre de pression ou mise en surpression / dépression du bâtiment en fonction de son réglage
	VMC simple flux par insufflation	-	-	-	Mise en surpression du bâtiment
	VMC simple flux par extraction	+	+	Augmentation de la mise en dépression du bâtiment	
Sous-sol / vides sanitaires ventilés	Présence d'un niveau (sous-sol ou vide sanitaire ventilés) précédant les lieux d'exposition	-	-	Rôle protecteur faisant office de barrière limitant les flux vers l'air des lieux d'exposition	
- : impact minimisant le dégazage		= : impact neutre sur le dégazage		+	impact majorant le dégazage

⁵ A adapter en fonction des composés concernés

3. Stratégie d'échantillonnage des gaz du sol

La composition d'une ligne d'échantillonnage est définie à partir :

- **d'un ouvrage** (temporaire ou permanent)
- **d'une technique d'échantillonnage** (ou de mesure), qui intègre des techniques de prélèvements avec :
 - soit des supports de prélèvement des substances présentes dans le milieu et des analyses qualitatives ou quantitatives en laboratoire,
 - soit des techniques de mesures sur site : mesures le plus souvent qualitatives, dont le résultat est connu directement sur site (ex : PID).

L'échantillonnage comprend soit un prélèvement (pour analyse en laboratoire) soit une mesure (réalisée sur site). La figure donnée en 6.4.1 clarifie ces terminologies.

3.1. CONTEXTES DE GESTION EN LIEN AVEC LA CARACTÉRISATION DES GAZ DU SOL

3.1.1. Contexte général

En fonction du niveau de connaissance du site et du type d'information souhaitée, deux approches principales peuvent être développées :

- Investigations de type « screening » :
Ce type d'investigations consiste en la mise en œuvre de moyens légers et rapides, privilégiant la possibilité de mesurer de larges gammes de concentrations et de nombreux composés volatils. Ce type d'approche est généralement retenu dans des contextes de levée de doute ou de diagnostics préliminaires. Des ouvrages temporaires, des mesures in situ (qualitatives / semi quantitatives) et/ou des méthodes analytiques / supports de prélèvement permettant l'analyse de plusieurs familles de composés à des gammes de concentrations variées sont généralement mis en œuvre dans cette approche.
- Investigations ciblées :
Ce type d'investigations consiste en l'emploi de moyens plus précis que dans les investigations de type « screening », avec la mise en œuvre d'ouvrages temporaires ou permanents (piézairs principalement) lorsqu'un suivi temporel est nécessaire, et le choix de techniques de prélèvement et méthodes analytiques ciblées sur les composés recherchés. En cas de suivi avec des ouvrages temporaires, la bonne répétition des configurations de prélèvement (localisations précise, profondeur...) devront être garanties.

Ces approches peuvent être utilisées dans différents contextes de gestion. Le tableau suivant présente les types de dispositifs les plus couramment mis en œuvre en fonction de l'approche retenue. Dans ce tableau, sont présentés des

types d'ouvrages de prélèvements avec des méthodes de prélèvements actives (mise en œuvre d'un flux d'air avec ou sans pompe) et passives (support de prélèvement exposé dans un milieu sans mise en œuvre de flux d'air).

Tableau 3 – Types de dispositifs couramment mis en œuvre en fonction de l'approche retenue

Approche retenue	Type de prélèvement	Ouvrage permanent	Ouvrage temporaire ⁶			
		Piézair sub-slab	Canne gaz	Sub-slab	Chambre à flux (pour transfert)	Enfouissement de support directement dans le sol
	Actif	cf. § 5.2 & 5.3	cf. § 5.4.1	cf. § 5.4.3	cf. § 5.4.2	-
	Passif	cf. § 6.4.7	-	cf. § 6.4.7	-	cf. § 6.4.7
Screening			X	X	X	X
Investigations ciblées		X	X	X	X	X

3.1.2. Caractérisation d'une source sol

Les sources sol de composés volatils souvent très ponctuelles sont difficiles à diagnostiquer / localiser, ce qui n'est pas le cas du panache gazeux qui se développe autour de ces sources.

Les concentrations mesurées dans les gaz du sol correspondent à un milieu qui intègre les émissions des composés volatils issus des sols et des eaux souterraines.

La mesure des gaz du sol peut donc permettre de cartographier la répartition des concentrations d'un composé volatil donné dans les gaz du sol et ainsi identifier les zones à fortes concentrations. En croisant ces données avec la connaissance du site (géologie, hydrogéologie, diagnostics réalisés), il est possible de déterminer les zones sources-sols. Le couplage de ces mesures avec la mesure sur site d'autres gaz (comme par exemple CO₂, O₂, H₂S et CH₄...) peut permettre d'identifier d'éventuels environnements dans lesquels une activité biologique (impliquant des polluants organiques) prend place. Pour certains composés, la présence de métabolites peut également permettre de mettre en évidence la dégradation des molécules mères (cf. partie 2.1).

⁶ Lorsque des ouvrages temporaires sont utilisés pour réaliser un suivi, il convient de s'assurer de la précision de l'implantation.

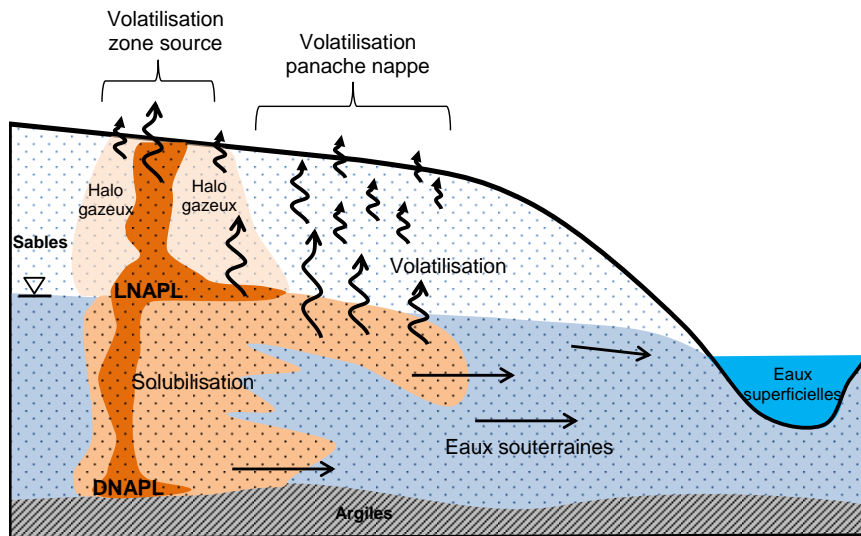


Figure 7 – Illustration des émissions gazeuses en zone source et des émissions gazeuses associées à un panache présent dans les eaux souterraines

3.1.3. Caractérisation d'un panache dans la nappe phréatique

Comme pour la localisation d'une source sol de composés volatils, la caractérisation des gaz du sol peut permettre de déterminer les zones à fortes concentrations en composés volatils issus des eaux souterraines. Cette méthode indirecte de recherche des composés volatils issus des eaux souterraines se développe de plus en plus en France et peut permettre une approche cartographique d'un panache de composés volatils dans les eaux souterraines. Cette approche est également plus économique car elle permet de limiter l'implantation de nouveaux piézomètres et les coûts qui y sont associés.

Remarque

En cas de délimitation d'un panache de pollution dans les eaux souterraines, la réalisation de mesure des gaz du sol en amont du panache de pollution et de sa zone d'influence est recommandée.

3.1.4. Caractérisation des gaz du sol au droit d'un bâtiment

En cas de suspicion ou détection de composés volatils au droit d'un bâtiment, la caractérisation de la qualité de l'air intérieur doit être réalisée. La caractérisation des gaz du sol sous bâtiment doit également être réalisée en parallèle des prélèvements dans l'air intérieur, afin de déterminer la contribution des gaz du sol aux concentrations mesurées dans l'air intérieur. Ces prélèvements réalisés sous les bâtiments ne permettent pas de caractériser une source de pollution située plus en profondeur sous le bâtiment (avec des concentrations plus élevées), mais peuvent permettre d'évaluer les concentrations directement sous le bâtiment, dans une optique d'évaluation des transferts.

Remarque

Dans certains contextes, le bâtiment visé est à l'état de projet et n'a pas encore été construit. Dans ce cas, au vu de l'impossibilité de réaliser des prélèvements d'air intérieur, seuls des prélèvements de gaz du sol seront réalisés à une profondeur cohérente avec le projet d'aménagement et avec la localisation de la source afin d'évaluer la qualité des gaz du sol à proximité des futures fondations les connaissances sur la répartition des pollutions dans les sols et / ou eaux souterraines (sources, panaches...).

Dans ce contexte, il est préférable de réaliser le prélèvement directement sous le bâtiment, c'est-à-dire :

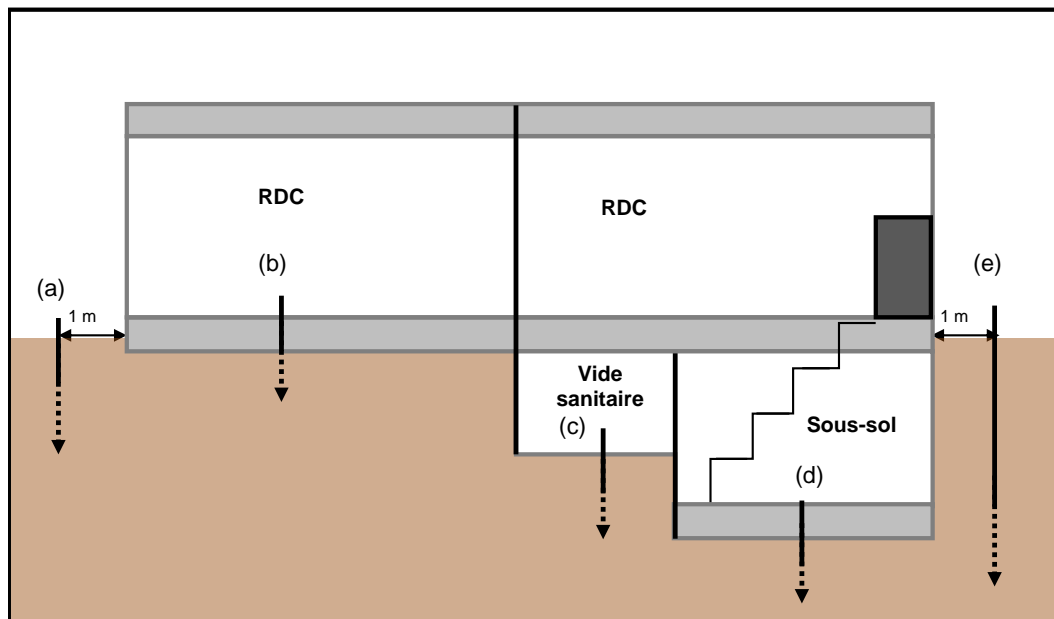
- sous la dalle du rez-de-chaussée (repère (b) sur la Figure 8) pour les bâtiments sans sous-sol ni vide sanitaire ;
- sous la dalle du sous-sol (repère (c) sur la Figure 8) ou les gaz du sol sous un vide sanitaire en terre battue (repère (d) sur la Figure 8) pour les bâtiments avec sous-sol ou vide sanitaire.

Lorsque la réalisation de prélèvements directement sous le bâtiment n'est pas possible (problèmes d'accès, chauffage au sol,...), des prélèvements de gaz du sol peuvent être réalisés via des cannes gaz ou des piézairs implantés à proximité immédiate du bâtiment (en général, une distance de 1 m du bâtiment est pratiquée) :

- pour les bâtiments sans sous-sol ni vide sanitaire, les ouvrages de prélèvement capteront les gaz du sol à environ 1 m de profondeur (repère (a) sur la Figure 8) afin de caractériser les transferts vers les bâtiments ;
- pour les bâtiments avec sous-sol ou vide sanitaire, les ouvrages de prélèvement devront capter les gaz du sol à la profondeur correspondant au plancher du niveau enterré (repère (e) sur la Figure 8).

Remarque

Lorsque des prélèvements de gaz du sol sous un vide sanitaire ou un sous-sol sont réalisés en lien avec des prélèvements d'air intérieur, il est recommandé de réaliser également des prélèvements de l'air de ce sous-sol ou vide sanitaire afin d'évaluer les transferts. Les prélèvements de gaz du sol permettront en outre de s'affranchir des risques de contamination liés à des potentielles sources présentes dans le sous-sol ou le vide sanitaire. Les chambres à flux peuvent également permettre d'évaluer des transferts notamment pour les sols en terre battue ne présentant pas de voies de transfert préférentielles.



- (a) prélèvement de gaz du sol à 1 m du bâtiment et à 1 m de profondeur
- (b) prélèvement d'air sous dalle au rez-de-chaussée
- (c) prélèvement de gaz du sol à 1 m de profondeur dans un vide sanitaire en terre battue
- (d) prélèvement d'air sous dalle en sous-sol
- (e) prélèvement de gaz du sol à 1 m du bâtiment et à une profondeur équivalente à la base du sous-sol

Figure 8 – Exemples d'implantation d'ouvrages de prélèvement de gaz du sol au droit ou en bordure d'un bâtiment

3.1.5. Étude de faisabilité et suivi des concentrations dans les gaz du sol dans le cadre de travaux de dépollution

Des prélèvements de gaz du sol sont également recommandés dans le cadre d'études de faisabilité de travaux de réhabilitation (cf. NF X 31620-4) et lors de la mise en œuvre d'opérations de dépollution et/ou post-traitement de composés volatils afin de :

- suivre l'abattement des concentrations dans le temps ;
- surveiller l'absence de relargage de composés volatils pendant les opérations de dépollution ;
- suivre l'efficacité d'un traitement (en particulier : suivi de la répartition des concentrations en polluants, notamment dans le cas de certains traitements (oxydation, réduction, biodégradation,...), avant, pendant et après (surveillance) des opérations de dépollution ;
- valider l'atteinte des objectifs de dépollution (caractérisation des pollutions résiduelles).

3.2. STRATÉGIE D'IMPLANTATION SPATIALE DES OUVRAGES DE PRÉLÈVEMENT

La localisation, le type d'ouvrage de prélèvement et la méthode d'implantation doivent être déterminés suffisamment en amont de la réalisation des investigations, et en cohérence avec :

- Les objectifs des investigations (cf. 3.1), incluant notamment la sensibilité des usages associés, le besoin d'évaluer la migration vers l'extérieur du site,...
- Le schéma conceptuel incluant notamment (au regard de la problématique gaz du sol) :
 - o les données issues des études historiques et documentaires,
 - o les données obtenues au cours de précédents diagnostics ou travaux de dépollution,
 - o le contexte géologique (lithologie) et hydrogéologique,
 - o la perméabilité à l'air des sols,
 - o la profondeur des eaux souterraines,
 - o la localisation, le nombre et la profondeur de sources de pollutions identifiées ou supposées,
 - o la nature et le comportement des polluants (solubilité, volatilité...),
 - o le niveau de pollution et sa répartition,
 - o la présence de voies de transfert préférentielles des gaz dans les sols (zones plus perméables, tranchées, réseaux, racines,...),
 - o la localisation d'ouvrages souterrains,
 - o la présence de bâtiments (ou d'autres installations en surface ou en profondeur),
 - o la présence d'excavation ou d'autres travaux à proximité,
- Le rayon d'influence des ouvrages de prélèvement envisagés,
- Les contraintes liées à tout forage (accès, réseaux enterrés...),
- Les contraintes liées à l'hygiène et la sécurité.

Les points détaillés dans la partie 2 doivent également être pris en compte lors de la détermination de la profondeur de l'échantillonnage.

Chaque site étant une combinaison unique de ces critères, il n'existe pas de stratégie d'implantation générique applicable à tous les sites (principe de spécificité ancré dans la méthodologie nationale de 2007 [MEDAD, 2007]).

Un plan d'échantillonnage présentant la localisation de tous les points envisagés doit être établi et chaque point doit être argumenté en tenant compte de tous les éléments mentionnés précédemment.

Toute modification de ce plan prévisionnel d'échantillonnage doit faire l'objet d'une argumentation dans le cadre du rapport intégrant les résultats du diagnostic (prestations LEVE, EVAL, CPIS ou PG de la norme NF X 31-620-2), afin de garantir la représentativité de l'ouvrage et des prélèvements réalisés.

Tableau 4 – Recommandations concernant la profondeur de prélèvement pour différents types d'ouvrages et de prélèvements

Recommandations <i>(les ouvrages permanents (type piézair) sont présentés en partie 5.2, les ouvrages permanents (type air sous dalle) sont présentés en partie 5.3, les ouvrages temporaires sont présentés en partie 5.4, les prélèvements passifs sont présentés en partie 6.4.7)</i>	Prélèvements actifs					Passifs cf. 6.4.7
	ouvrage permanent		ouvrage temporaire			ouvrage temporaire / permanent
	piézair cf. 5.2	sub-slab cf. 5.3	canne gaz cf. 5.4.1	sub-slab cf. 5.4.3	chambre à flux (pour transfert) cf. 5.4.2	
La profondeur minimale d'échantillonnage (toit de la zone crépinée) ne devrait pas être inférieure à 1 m sous la surface du sol (ISO 10381-7 et VDI 3685-2) en raison de l'influence non maîtrisée de l'air ambiant à faible profondeur et de la variabilité de la perméabilité à l'air selon les fluctuations de l'humidité du sol.	X (sauf ouvrage en intérieur sous dalle béton)	-	X	-	-	X (sauf pour canne gaz et chambre à flux)
Si les investigations nécessitent la réalisation de prélèvements à moins de 1 m de profondeur (en raison de contraintes ou de caractéristiques spécifiques), cela doit être argumenté et renseigné de façon transparente dans le rapport d'échantillonnage et les recommandations suivantes prises en compte. Le toit de la zone crépinée ne doit cependant pas être inférieur à 50 cm.	X	-	X	-	-	X (sauf pour canne gaz et chambre à flux)
Si la profondeur d'échantillonnage est inférieure à 1 m , et en l'absence d'étanchéité de surface en bon état (sol à nu, enrobé poreux...), il est recommandé : - d'étanchéifier le sol à l'air sur un diamètre minimum de 5 m autour du point d'échantillonnage (par exemple à l'aide d'une géomembrane chimiquement inerte et étanche (et étanchéifié au niveau de l'ouvrage) ou tout autre matériau étanche et inerte chimiquement), - de limiter au maximum la hauteur de la zone crépinée (généralement de l'ordre de 20 cm). En cas d'impossibilité d'étanchéifier le sol à l'air sur un diamètre minimum de 5 m autour du point d'échantillonnage, par exemple en raison d'une localisation dans un espace plus étroit, ou la présence d'engorgements au sol : - le point de prélèvement pourra être déplacé (tout en permettant l'atteinte des objectifs fixés) vers une zone permettant d'étanchéifier le sol à l'air sur un diamètre minimum de 5 m autour du point d'échantillonnage, ou - le diamètre d'étanchéification pourra être ramené à 2 m autour du point d'échantillonnage (minimum en deçà duquel le prélèvement n'est plus réalisable) avec un argumentaire détaillé attestant de l'absence d'interférence de l'air ambiant. Cet argumentaire sera basé au minimum sur le volume prélevé, le débit de prélèvement, la nature de sols, le rayon de captage estimé, l'absence de voie de transfert préférentielle des gaz.	X	-	X	-	-	(X)
Pour l'échantillonnage d'air sous une dalle béton, l'opérateur doit vérifier l'état de la dalle pour identifier toutes les voies préférentielles entre l'air intérieur et l'air sous la dalle (fissures, lacunes, etc.). L'étanchéité à l'air des sondes / cannes de prélèvement, au passage de la dalle, doit être garantie avec un joint compact fait d'un matériau inerte (type bentonite).	-	X	-	X	X	X
En cas de caractérisation synchrone de l'air intérieur et des gaz du sol au droit d'un bâtiment, il est recommandé de réaliser l'échantillonnage des gaz juste sous le bâtiment (via un prélèvement d'air sous dalle ou de gaz du sol), afin d'aider à l'interprétation et à la compréhension de la contribution des gaz du sol aux concentrations mesurées dans l'air intérieur.	X	X	X	X	X	X
Le fond de l'ouvrage de prélèvement doit être situé à au moins 1 m au-dessus des eaux souterraines, afin d'éviter la remontée d'eaux dans l'ouvrage. Le plus haut niveau de la nappe phréatique (ou de la frange capillaire si elle a été déterminée) connu est considéré, et le fond de l'ouvrage sera implanté au plus profond 1 m au-dessus de ce niveau des plus hautes eaux (ou de la frange capillaire si elle a été déterminée).	X	X	X	X	X	X
La zone crépinée de l'ouvrage de prélèvement devrait être entièrement implantée dans une même lithologie et ne pas traverser plusieurs horizons.	X	-	X	-	-	X
La hauteur de l'intervalle crépiné est généralement comprise entre 0,5 et 1 m et ne doit pas dépasser les 1 m.	X	-	-	-	-	X
Différentes profondeurs d'échantillonnage peuvent être envisagées afin d'évaluer la distribution verticale des concentrations (voir partie 5.2.2).	X	-	X	-	-	X

X : recommandation à suivre pour ce type d'ouvrage et/ou de prélèvement

- : recommandation non pertinente pour ce type d'ouvrage et/ou de prélèvement

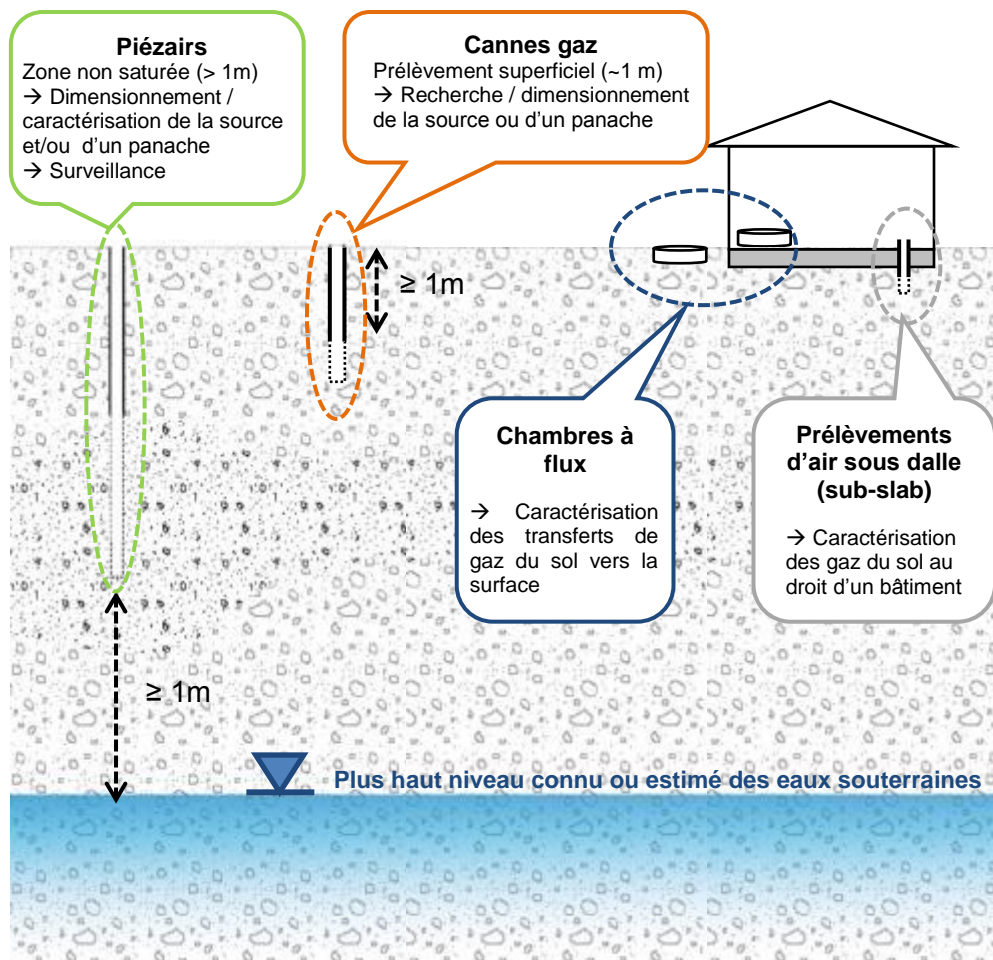


Figure 9 – Schéma de principe des différentes configurations de caractérisation des gaz du sol ou de leur transfert

3.3. PÉRIODE, FRÉQUENCE ET DURÉE DES PRÉLÈVEMENTS

Les concentrations des composés volatils dans les gaz du sol varient au cours du temps en raison des paramètres évoqués en partie 2.3.2.

Il est recommandé de réaliser les prélèvements de gaz du sol dans des conditions favorisant le transfert des substances gazeuses vers l'air intérieur et/ou l'air extérieur.

Afin d'avoir une vision plus représentative du phénomène de dégazage et d'exploiter les résultats de caractérisation de gaz du sol de la manière la plus pertinente possible, il est recommandé pour les prélèvements de gaz du sol, de réaliser *a minima* deux campagnes d'échantillonnage par an dans des conditions météorologiques et environnementales différentes et très contrastées (ex : une en période hivernale et une en période estivale). En outre, si la pollution est liée à un phénomène de dégazage des eaux souterraines, il faut porter attention aux périodes de hautes eaux et basses eaux.

L'ensemble des paramètres listés en partie 2.3.2 devront être mesurés pendant le prélèvement mais également pour certains, sur les jours précédents.

Les durées de prélèvement devront être adaptées aux objectifs de l'étude, en cohérence avec les spécifications des constructeurs des dispositifs mis

en œuvre et des limites de quantification adéquates au regard des critères de comparaison retenus pour l'interprétation des concentrations observées.

4. Stratégie d'échantillonnage de l'air intérieur

L'élaboration du plan d'échantillonnage d'air intérieur doit être basée sur l'étude documentaire, notamment l'historique du site, le schéma conceptuel et la connaissance des durées de fréquentation des lieux par les populations. Dans le cas d'une étude dont l'origine est une problématique sanitaire avérée ou suspectée, l'étude documentaire peut être plus courte tandis que le panel des substances recherchées sera plus important.

Une visite des lieux est également requise. Un questionnaire d'enquête (cf. Annexe 4) permettra de guider cette visite et de faciliter la reconnaissance des spécificités du lieu, comme certains paramètres favorisant le transfert de composés volatils depuis le sol et/ou la nappe vers l'air intérieur, ou la présence d'autres sources de substances co-contributrices liées à l'environnement intérieur. L'ensemble de ces paramètres est repris plus en détails ci-après.

Le contexte de l'étude et les critères de comparaison retenus pour l'interprétation des concentrations observées dans l'air intérieur déterminent les limites de détection et de quantification à obtenir, qui elles-mêmes déterminent le choix des méthodes de prélèvement, leur durée, le choix des supports et des méthodes d'analyses (cf. paragraphe 4.4.2).

En rappel, la composition d'une ligne d'échantillonnage est détaillée en partie 3.

4.1. CONTEXTES DE GESTION EN LIEN AVEC LA CARACTÉRISATION DE L'AIR INTÉRIEUR

Conformément à la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués, les mesures de concentrations dans l'air (gaz du sol, air intérieur ou air extérieur / ambiant) font l'objet d'un approfondissement progressif et proportionné à la problématique du site. Les situations conduisant à la mise en œuvre de mesures dans l'air intérieur sont diverses :

- évaluation de l'existence ou non d'un transfert ;
- identification des zones émissives et des zones d'accumulation ;
- confirmation de l'absence d'impact ;
- évaluation des expositions des populations ;
- vérification de l'atteinte des objectifs des mesures de gestion ;
- suivi ou vérification de l'évolution de la qualité des milieux.

La stratégie d'échantillonnage sera étroitement liée à l'objectif visé. Aussi, la définition de l'objectif des mesures de qualité de l'air intérieur (QAI) est un préalable incontournable, afin d'obtenir des résultats interprétables et potentiellement comparables. Il est en effet difficile d'utiliser une seule campagne de mesures pour des besoins distincts : mise en évidence de transferts ou évaluation de l'exposition car les types d'échantillonnages sont parfois différents. La stratégie d'échantillonnage et son dimensionnement doivent également tenir compte de l'objectif visé mais également des spécificités des lieux concernés par l'étude, afin de s'assurer au mieux de la représentativité spatiale et temporelle des mesures. Il convient également d'avoir une bonne connaissance des

paramètres d'influence, afin d'une part, de les mesurer et d'autre part, de les considérer lors de l'interprétation des résultats.

Des recommandations fournies [Fluxobat, 2013], pour le dimensionnement des mesures pour l'air intérieur sont rappelées dans le tableau suivant.

Tableau 5 – Dimensionnement des mesures de concentrations dans l'air intérieur en fonction des objectifs (source [Fluxobat, 2013])

Objectif de la mesure	Périodes de mesure	Type de mesure	Durée d'échantillonnage	Nombre minimal de points de mesures	Nombre minimal de campagnes
(1) Identifier les zones émissives et d'accumulation et établir le lien avec les concentrations dans le sol	Période propice aux transferts	mesures semi quantitatives de type PID avec une sensibilité au ppbV en premier lieu	mesures ponctuelles ou en continu (variations temporelles éventuelles)	Multiples dépendant du site; maillage a minima: au niveau de l'interface avec le sol, des zones préférentielles d'entrées (canalisation, fissures) et dans les zones d'accumulation	2 à 3
		mesures quantitatives	Longues périodes à privilégier si compatible avec l'absence de facteurs d'interférence.	Multiples dépendant du site (dont zones d'accumulation)	1 à 2
(1) Confirmer l'absence d'impact	Période propice aux transferts	mesures quantitatives		Multiples dépendant du site (dont zones d'accumulation)	2 à 3 en l'absence d'impact
(2) Evaluer les exposition des populations	Périodes contrastées (été / hiver)	mesures quantitatives	Représentatif de la fréquentation usuelle des lieux. Longues périodes à privilégier si compatible avec l'absence de facteurs d'interférence.	Multiples dépendant du site (ciblé sur les pièces de vie)	3 (2 en hiver et 1 en été)
(3) Vérifier les concentrations résiduelles dans l'air (après travaux)	Identique à la mesure de référence (pour comparaison). A priori en périodes contrastées	mesures quantitatives	Identique à la mesure de référence (pour comparaison). A priori représentatif de la fréquentation usuelle des locaux.	Identique à la mesure de référence (pour comparaison). Multiples dépendant du site (dont pièces de vies et zones d'accumulation)	2 à 3
(4) Vérifier l'évolution de la situation	Périodes contrastées (été / hiver)	mesures quantitatives	Identique à toutes les campagnes. Représentatif de la fréquentation usuelle des locaux.	Multiples dépendant du site (pièces de vies ainsi que les zones d'accumulation).	hiver et été durant 4 ans (pour bilan quadriennal)

4.2. CARACTÉRISTIQUES SPÉCIFIQUES DE L'ENVIRONNEMENT AIR INTÉRIEUR ET DESCRIPTION DES LIEUX

De nombreux paramètres impactent la qualité de l'air intérieur. En effet, plusieurs centaines de composés organiques volatils (COV), issus de diverses sources, sont présents dans l'air intérieur des bâtiments. Les émissions de composés organiques volatils peuvent être présentes en permanence ou par intermittence. Le milieu « air intérieur » n'est pas un milieu statique et les concentrations de substances volatiles sont susceptibles de varier dans le temps en fonction de :

- la source d'émission (historique, sol / nappe, externe / origine domestique...),
- les interactions chimiques,
- les activités réalisées dans les locaux (utilisation de produits, chauffage...),
- les mécanismes d'adsorption par la surface de revêtements, mobilier et autres éléments,
- les ventilations (mécaniques ou naturelles) des locaux,
- les conditions climatiques extérieures et intérieures.

Ainsi, en amont de la définition du plan d'échantillonnage et de la mise en œuvre des dispositifs de prélèvement, une connaissance détaillée des lieux est nécessaire. Cette étape relative au recueil d'informations concerne notamment le lieu, son environnement immédiat et les personnes le fréquentant ainsi que les activités exercées. Cette connaissance est acquise par le biais :

- de l'étude documentaire (plans, descriptif des dispositifs constructifs, de la ventilation, etc.) ;
- de l'examen détaillé des lieux ;
- d'entretien avec les usagers.

Ces informations sont obtenues notamment lors d'une enquête préliminaire qui est à réaliser préalablement à toute campagne de prélèvement d'air intérieur. Un modèle de Questionnaire d'Enquête Préliminaire est fourni en Annexe 4. Les consignes à respecter lors des prélèvements seront transmises aux usagers lors de cette enquête.

Il est fortement recommandé d'utiliser ce questionnaire ou un questionnaire similaire lors de l'enquête préliminaire, mais aussi avant, pendant et après le prélèvement, afin de collecter toutes les informations pertinentes concernant notamment :

- les conditions environnementales de l'intérieur des bâtiments,
- la description de l'environnement (présence potentielle d'autres sources de contamination comme les matériaux, les revêtements intérieurs, le mobilier, la décoration, les dalles fissurées, les passages de réseaux au travers des dalles, les cages d'ascenseur, les cheminées, etc.),

- les activités des occupants (par exemple, le tabagisme, les activités de bricolage et de cuisine, d'entretien, l'ouverture des portes et fenêtres, les feux de cheminées, etc.),
- l'identification et la description des voies préférentielles de transfert de composés volatils depuis le sol et/ou la nappe (ex : passages de réseaux au travers des dalles, trappes d'accès aux sous-sols / vides sanitaires, fissuration des dalles béton, sorties de canalisations (éviers, etc.), gaines électriques, cages d'ascenseurs et d'escaliers, cheminées, etc.). **Les points de prélèvement ne devront pas être placés à proximité** de ces éléments (sauf en cas de caractérisation du transfert ou de leurs effets).

Remarque

Dans le cas de prélèvements sur une durée de plusieurs jours (prélèvements passifs ou prélèvements actifs de longue durée), ce questionnaire doit être laissé dans la pièce étudiée, afin que les usagers puissent le remplir pendant la période d'échantillonnage en lien avec des activités susceptibles de modifier la qualité de l'air. Il devra être vérifié et complété, dans la mesure du possible, lors de la récupération du matériel de prélèvement.

4.3. STRATÉGIE D'IMPLANTATION SPATIALE DES POINTS DE PRÉLÈVEMENT

Les gaz du sol présents sous le bâtiment et potentiellement chargés en composés volatils, sont susceptibles de cheminer vers l'air intérieur du bâtiment ou vers l'air extérieur. La variabilité spatiale des concentrations dans l'air intérieur peut être importante au sein du même bâtiment. Elle est essentiellement en lien avec la localisation des sources de pollution et leur hétérogénéité ainsi qu'avec les différences d'interface entre le bâtiment et le sol (type de fondation, vide sanitaire, cave, type de dallage, sol à nu...), les voies préférentielles de transfert (constructives, en lien avec la perméabilité à l'air des matériaux de construction, défaut d'étanchéité à l'air), les conditions d'aération des différentes pièces et les conditions de mélange et de dilution des pollutions dans l'air (entre les différents étages ou variabilité au sein d'une même pièce).

4.3.1. Pièces à étudier : pièces "échantillon"

Le nombre de pièces « échantillon » pour l'air intérieur est bien entendu dépendant des caractéristiques du bâtiment, de la sensibilité des usages et de l'objectif des mesures. Ainsi, au regard du bâti étudié, les pièces « échantillon » seront les plus représentatives possibles des différents lieux fréquentés par la population.

Remarque

Un rapprochement peut être effectué dans le choix des pièces échantillons avec la notion de zone homogène présentée dans les documents normatifs pour le radon (NF EN ISO 11665-8 de 2013) et rappelée dans [Fluxobat, 2013]. Il est ainsi rappelé que « *dans ces documents, les hétérogénéités de pollution ou de lithologie ne sont pas considérées, les zones homogènes* ».

étant donc définies uniquement vis-à-vis des hétérogénéités du bâtiment » [Fluxobat, 2013]. Ces zones homogènes sont déterminées afin de présenter les mêmes caractéristiques de ventilation, de température mais aussi par le type d'interface sol-bâtiment.

Les pièces privilégiées sont à choisir, en cohérence avec le schéma conceptuel, c'est-à-dire en combinant au mieux les caractéristiques suivantes :

- **au droit des sources de contamination du sol et/ou de la nappe** (attention aux sources « sol » hétérogènes). Dans un objectif de compréhension des transferts et d'interprétation, il conviendra d'effectuer un prélèvement d'air intérieur dans le sous-sol ou le vide sanitaire même si aucun usage n'est associé. Le cas échéant, un prélèvement pourra être couplé avec un prélèvement de gaz du sol, tout en veillant à ne pas croiser les contaminations en polluant l'air intérieur avec de des gaz sol contaminé ni à créer de voies de transfert préférentielles à l'issue du prélèvement ;
- **usage des lieux et durée d'occupation.** Les situations conduisant à la mise en œuvre de mesures dans l'air intérieur étant diverses, il est nécessaire de positionner les points de mesures en fonction des objectifs recherchés en intégrant des mesures permettant leur interprétation. (dispositions constructives favorisant le transfert (cage d'escalier, ascenseur, gaines techniques, trappes et réseaux lorsqu'ils traversent les planchers, etc.).

Il convient de noter que toutes les pièces qui doivent être instrumentées doivent l'être sur une même période (ex : même semaine d'échantillonnage). De même, les différentes substances doivent être mesurées simultanément, dans les mêmes pièces.

Remarque : Sauf raison motivée, il n'est pas recommandé de réaliser de prélèvements dans les pièces d'eau (dont les salles de bain) qui concentrent de nombreuses molécules volatiles (parfums...) ainsi qu'une plus forte humidité.

4.3.2. Hauteur et localisation des prélèvements

Il est recommandé au moins un point de prélèvement par pièce « échantillon ». En cas de pièces d'important volume (gymnases, bureaux de type open-spaces,..) le nombre de points de prélèvement par pièce sera à adapter en fonction du volume de la pièce, de ses caractéristiques et des enjeux.

Dans le cas d'une évaluation des expositions, le prélèvement devra être au maximum représentatif de l'air respiré par les occupants dans la pièce, notamment vis-à-vis de remontées de vapeurs depuis le sol et/ou la nappe. Ainsi, l'échantillonnage de l'air pour l'évaluation des expositions des populations ou pour une surveillance devra être réalisé, en général (et sauf argument particulier), au centre de la pièce **à une distance d'au moins 1 m des parois de la pièce** (mur/plafond), à partir d'un point situé à hauteur des voies respiratoires, soit par exemple, de l'ordre de :

- 1,5 m du sol pour un adulte debout ;
- 1,0 m du sol pour un adulte assis (cas des bureaux notamment) ;
- 0,5 m du sol pour une position couchée (cas des chambres) ;
- 0,2 m pour un enfant dans le cas d'une crèche.

En outre, concernant les prélèvements sur support passif, il est possible de placer deux supports à proximité l'un de l'autre, notamment si seule une pièce est échantillonnée, afin de conforter le résultat et limiter les incertitudes liées au prélèvement et à l'analyse. Si des prélèvements sont effectués dans plusieurs pièces, un support passif peut être placé par pièce échantillonnée.

De même, si le contexte le justifie (difficulté à revenir sur site en cas de mesures non valides par exemple), il peut être judicieux de réaliser deux mesures en parallèle pour certains points de prélèvements, l'analyse du réplicat ne sera pas réalisée de façon systématique mais uniquement si la première mesure n'est pas valide.

▪ ***Si l'objectif des prélèvements d'air intérieur est d'évaluer l'exposition des personnes***

Il conviendra :

- d'éviter les zones de la pièce largement exposées à des courants d'air, comme les zones proches de portes et fenêtres ainsi que les zones proches des sources de chaleur ;
- d'éviter les zones proches de sources de pollution de l'environnement intérieur connues (activités de peinture, stockage de produits de nettoyage, etc.) ;
- dans la mesure du possible, de placer le dispositif de façon à ce qu'il se trouve hors de portée des enfants.

En cas de présence de voies préférentielles de transfert au sein même de la pièce (lavabos, éviers, gaines électriques, tuyaux de chauffage ...), une attention particulière sera portée sur le choix de l'emplacement du point de prélèvement. Pour une caractérisation globale de la qualité de l'air respiré (sauf en cas de présence prolongée des occupants à proximité), ces emplacements de prélèvements ne seront pas privilégiés dans un premier temps. Des prélèvements ou mesures ciblés sur ces emplacements peuvent être effectués dans le cadre spécifique d'une recherche des voies préférentielles de transfert, avec des appareils de terrain : PID, FID, chromatographes. Les résultats sont indicatifs et les limites de détection doivent être adaptées notamment au regard du cadre d'interprétation prévu.

- **Si l'objectif des prélèvements d'air intérieur est d'obtenir une meilleure compréhension des transferts ou de déterminer le dimensionnement de mesures de gestion**

Les prélèvements devront être réalisés soit dans les zones accumulant le plus fortement les substances volatiles issues du sol ou des eaux souterraines (vide sanitaire, sous-sol et cave...) soit au plus proche des entrées de polluants. En cas de présence de voies préférentielles de transfert (réseaux d'eaux usées, gaines électriques, tuyaux de chauffage, regard ou accès vers les tranchées et arrivées de canalisations enterrées, racines,...), des investigations sont à mener au sein de ces réseaux (canalisations d'eaux usées, gaines...) situés dans le bâti et/ou aux abords des bâtiments. Une reconnaissance PID associée à des échantillonnages des gaz intérieurs de ces milieux (intérieur des canalisations et gaines) peuvent mettre en évidence leur rôle éventuel de vecteur des polluants depuis les gaz du sol vers l'intérieur des bâtiments.

Afin d'évaluer la contribution des gaz du sol aux concentrations mesurées dans l'air intérieur et pour assurer une meilleure compréhension de ces transferts, il conviendra d'effectuer en parallèle des prélèvements de gaz du sol selon les spécifications détaillées en partie 6.5.

Rappel

Dans le cas de prélèvements de gaz du sol ou d'air sous dalle réalisés dans un bâtiment en parallèle de prélèvements d'air intérieur et dans une même pièce, les précautions suivantes doivent être prises, afin d'éviter toute contamination de l'air intérieur depuis des gaz du sol s'échappant de l'ouvrage :

- Réaliser les prélèvements d'air intérieur de préférence avant la réalisation des prélèvements des gaz du sol, afin de limiter les risques de perturbation liés aux prélèvements de gaz du sol ou à la création de l'ouvrage ;
- En cas de forage de la dalle, aspirer les poussières et/ou attendre que les poussières mises en suspension lors du perçage soient retombées ;
- Ne pas évacuer l'air de la purge du piézair, du prélèvement d'air sous dalle ou de la canne-gaz directement dans la pièce pendant ou avant le prélèvement d'air intérieur ; Fermer hermétiquement l'ouvrage de prélèvement d'air sous dalle ou de gaz du sol en dehors des phases de prélèvement pour éviter le dégazage de composés volatils vers l'air intérieur.

4.3.3. Autres points de mesure : points de "l'environnement local témoin"

Pour l'interprétation des résultats, la caractérisation de la qualité de l'air intérieur de l'environnement local témoin sera à réaliser en parallèle, hors influence de l'impact potentiel des émissions de substances volatiles issues du sol et/ou de la nappe. **Ceci implique des prélèvements additionnels sur site en intérieur et à l'extérieur.**

a) Témoin intérieur

Pour aider à l'interprétation des résultats, et **lorsque les configurations le permettent, un prélèvement d'air intérieur témoin *a minima* est à réaliser.**

Les prélèvements d'air intérieur témoins doivent être réalisés durant la même période et avec la même méthode que pour les pièces échantillons », dans des locaux :

- supposés non influencés par des composés gazeux issus du sol et/ou des eaux souterraines,
- et possédant les mêmes caractéristiques (configurations, activités, ventilation, chauffage...) que les locaux ciblés par le diagnostic,

afin d'apprécier la contribution des composés organiques volatils liée au bâtiment par rapport aux concentrations mesurées dans l'air intérieur de la pièce « échantillon ». Des témoins intérieurs pertinents peuvent ainsi être réalisés en cas de bâtiments identiques (mêmes dispositions constructives et usages) avec un des bâtiments situés en dehors de la zone de pollution, ou en cas de bâtiments possédant suffisamment d'étages pour que l'air situé dans les étages les plus élevés ne soit pas impacté par une pollution venant du sol ou des eaux souterraines.

La pertinence du (des) témoin(s) intérieur retenu(s) ou l'impossibilité de réaliser de tels prélèvements devra être discuté et argumenté.

b) Témoin extérieur

Les concentrations à l'intérieur d'un bâtiment étant susceptibles d'être influencées par celles de l'air extérieur, il convient également de réaliser **a minima un point de prélèvement à l'extérieur du bâtiment** en un point où l'impact de la pollution du sol/nappe aura été estimé minimal (situation en amont éolien et/ou hydraulique à privilégier). Pour définir la contribution de sources extérieures, la norme expérimentale XP X43-402 indique qu'un prélèvement doit être réalisé :

- à une hauteur de 1,5 m par rapport au sol,
- à une distance raisonnable du mur du bâtiment, au minimum de 2 mètres et au maximum de 5 mètres,
- en tenant compte de la localisation et du type des entrées d'air neuf (remarque : pour certains bâtiments, les entrées d'air neuf se trouvent exclusivement sur les toitures), ainsi que des sorties et rejets d'air (bouches de ventilation...).

Les sources extérieures potentielles (parking, voies de circulation...) doivent être clairement identifiées dans le questionnaire d'enquête préliminaire (Annexe 4) et être intégrées lors du choix du positionnement des témoins extérieurs.

Les prélèvements de l'environnement local témoin extérieur doivent être réalisés simultanément (même période de mesure, même méthode) aux prélèvements effectués dans les pièces « échantillon ».

La description et les conditions de prélèvement des prélèvements témoins devront être documentées au même titre que pour les pièces « échantillon ».

4.4. STRATEGIE D'ÉCHANTILLONNAGE TEMPOREL

4.4.1. Période et fréquence des prélèvements

Afin d'évaluer le transfert des gaz du sol vers l'air intérieur et de prendre en compte la variabilité saisonnière, il est recommandé de **réaliser a minima deux campagnes de prélèvements par an⁷ sur des périodes contrastées** : l'une en période hivernale (avec chauffage) et l'autre en période estivale.

Les concentrations dans l'air intérieur et dans les gaz du sol induites par la présence de pollution dans le milieu souterrain présentent des variations temporelles à plusieurs échelles : horaire, journalier, saisonnier. Ces variations sont le fait des conditions météorologiques (vent, température, pression, pluie) et du mode d'utilisation des lieux investigués par les occupants (conditions de chauffage et de renouvellement d'air). Par ailleurs, dans l'air intérieur, les activités des occupants, les mobiliers ou les revêtements peuvent également être source d'un impact dans l'air intérieur. Cela complique l'interprétation des résultats, notamment pour identifier la contribution d'une éventuelle pollution en provenance du sous-sol.

L'amplitude de cette variabilité, dépendante du bâti, des sols et de la pollution a été documentée lors de plusieurs programmes de recherche appliquée [FLUXOBAT, 2013 ; CITYCHLOR, 2013,].

La période de prélèvement sera choisie en fonction des influences potentielles connues de ces facteurs mais également pressenties lors de la visite.

En particulier, de manière à apprécier les concentrations dans l'air intérieur potentiellement contaminé par des gaz issus du milieu souterrain, les prélèvements seront réalisés autant que possible dans des **conditions majorantes pour l'émission de composés volatils** depuis les sols et/ou les eaux souterraines vers l'air intérieur.

Et dans le cas de mesures d'exposition, les prélèvements seront réalisés dans des **conditions usuelles d'occupation**.

Ces conditions de prélèvements sont à documenter, pendant le prélèvement mais également, pour certaines, sur les jours précédents. Elles concernent notamment les conditions de ventilation et de chauffage des bâtiments, la température à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments, la vitesse et la direction du vent, l'évolution de la pression barométrique et le niveau de la nappe, etc. Ces facteurs (cf. partie 2.3) influent sur la différence de pression entre le sol et les bâtiments, qui joue un rôle potentiellement déterminant dans le transfert des gaz du sol vers l'air intérieur (gaz du sol aspirés ou non).

⁷ La majorité des guides et normes mentionnent la nécessité de réaliser plusieurs campagnes de mesures [MADEP, 2002], certains spécifiant au moins deux périodes de mesures. ([MADEP, 2011], XP43-402, 1995). Le nombre minimal de campagnes nécessaire pour conclure sur l'existence ou non d'un transfert de COV vers l'air intérieur est, pour [MADEP, 2011] de 2 à 4 campagnes pour les écoles et habitations et de 2 campagnes pour les locaux à usage commercial ou industriel, la norme XP43-402 (1995) conseille quant à elle la réalisation de 3 campagnes. Par ailleurs, le décret n°2012-14 du 5 janvier 2012 concernant la surveillance de la qualité de l'air intérieur des ERP indique que les mesures devront être réalisées tous les 5 à 7 mois avec une campagne durant l'hiver.

En conséquence, et comme précisé au début de ce paragraphe, afin d'évaluer le transfert des gaz du sol vers l'air intérieur et de prendre en compte la variabilité saisonnière, il est recommandé de **réaliser a minima deux campagnes de prélèvements par an sur des périodes contrastées.**

Remarques

- ① - La fréquence pourra être augmentée en fonction de la sensibilité des cibles, des concentrations mesurées, et des types de variations attendues.
- ② - Il convient de noter que pour les différentes campagnes de prélèvements, les pièces instrumentées devront être les mêmes. Ainsi, il conviendra de repérer toute pièce pouvant éventuellement être instrumentée mais pour laquelle des changements en cours d'année sont à prévoir (rénovation par exemple), impliquant de ne pas pouvoir instrumenter les mêmes pièces lors des deux campagnes de prélèvements.
- ③ - Il conviendra de conserver la même numérotation des pièces étudiées, définie lors de la construction de la stratégie d'échantillonnage spatial, pour les différentes séries de prélèvements, ainsi que les mêmes méthodologies de prélèvement et d'analyse.
- ④ - Dans le cas où une seule campagne peut être réalisée (sites en cours d'aménagement, de réaménagement ou de démolition par exemple), il est recommandé de choisir la période la plus favorable aux transferts des gaz du sol vers l'air intérieur et donc à la présence de concentrations majorantes dans l'air du bâtiment. Il n'est alors pas possible de transposer la situation mesurée à des estimations d'expositions des populations sur le long terme.
- ⑤ - Dans le cas d'un objectif d'évaluation des expositions, si les prélèvements ne sont pas réalisés en conditions usuelles d'occupation des locaux (par exemple pour des raisons d'organisation), il est alors recommandé de s'en rapprocher, notamment au niveau des habitudes d'aération (ouvertures usuelles des portes, des fenêtres (re-simulation de mouvements d'air)) et de chauffage. Il est préférable de veiller à ce qu'aucune activité potentiellement co-contributrice (activités des populations telles que bricolage, tabagisme, etc.) ne soit effectuée en parallèle du prélèvement, et le cas échéant, cela doit être renseigné (cf. Annexe 4 et Annexe 6⁸). Ces recommandations doivent être clairement transmises aux usagers et aux opérateurs de terrain afin qu'elles soient bien respectées sur toute la durée des prélèvements.

4.4.2. Durée des prélèvements

Il est nécessaire de préciser les objectifs préalablement à toute campagne de prélèvements de la qualité de l'air intérieur : mise en évidence de transferts ou évaluation de l'exposition.

⁸ L'Annexe 4 prévoit également de renseigner ces activités en temps normal. Cela peut être utile pour l'interprétation de signalements d'odeurs éventuelles et pour la mise en perspective des résultats de la mesure.

Les durées de prélèvement devront être adaptées aux objectifs de l'étude, en cohérence avec les spécifications des constructeurs des dispositifs mis en œuvre et des limites de quantification adéquates au regard des critères de comparaison retenus pour l'interprétation des concentrations observées.

Le schéma de principe ci-après illustre la représentativité des différents types d'échantillonnage réalisés en air intérieur : les actifs et les passifs.

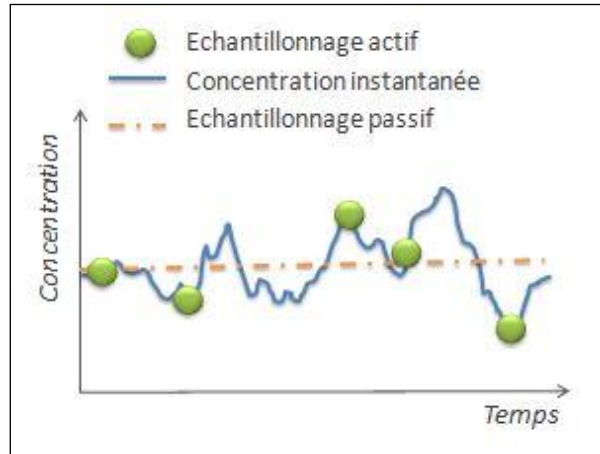


Figure 10 – Schéma illustrant la représentativité des échantillonnages en fonction de la durée de prélèvement

À titre d'exemple :

- pour les prélèvements actifs, la norme expérimentale XP X43-402 donne une durée de 24h. La durée des prélèvements sera à adapter afin d'être représentative du budget espace/temps des occupants des locaux. Pour des prélèvements réalisés en zone résidentielle, les habitations peuvent être occupées surtout le soir et la nuit. Les contraintes liées à l'organisation des campagnes de mesures ne doivent pas primer sur les bonnes pratiques à mettre en œuvre pour être représentatif. Ainsi, si les nuisances sonores empêchent l'utilisation de pompes, l'échantillonnage par conteneurs en dépression (canisters) sera alors à privilégier. Dans le cas de prélèvements réalisés dans un environnement professionnel (hors suivi réglementaire de l'hygiène du travail : bureaux, activités tertiaires...) la durée des prélèvements actifs sera de l'ordre de 8h correspondant au temps de présence des salariés ;
- pour les prélèvements passifs, différentes durées d'échantillonnage peuvent être préconisées, afin d'être pertinentes au regard des objectifs de l'étude, du type d'environnement étudié, des spécificités des supports et des conditions d'occupation des locaux. Par exemple, [LCSQA⁹-INERIS, 2008] a préconisé une durée de prélèvement de 4,5 jours (du

⁹ Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air est un Groupement d'Intérêt Scientifique qui regroupe trois partenaires : l'INERIS, le Laboratoire National de métrologie et d'Essais(LNE) et les Mines de Douai. Le LCSQA est le laboratoire d'expertise et de référence au service du Ministère chargé de l'Environnement et des AASQA dans le domaine de la surveillance de la qualité de l'air ambiant.

lundi au vendredi) dans ses protocoles de surveillance du formaldéhyde et du benzène dans les lieux scolaires et d'accueil de la petite enfance¹⁰ (lieu inoccupé le week-end) alors que les protocoles utilisés dans le cadre de l'étude menée dans les logements français [OQAI, 2006] indiquent un temps de prélèvement de 7 jours, afin de prendre en compte la période du week-end. Le décret n° 2012-14 du 5 janvier 2012 relatif à l'évaluation des moyens d'aération et à la mesure des polluants effectuées au titre de la surveillance de la qualité de l'air intérieur de certains établissements recevant du public précise des durées de prélèvements de 4,5 jours.

¹⁰ Ces protocoles ne concernent que les lieux scolaires et d'accueil de la petite enfance mais d'autres lieux clos ouverts au public pourront être traités dans des versions ultérieures. L'entrée en vigueur de ce nouveau dispositif réglementaire est progressive et devra être achevée, selon les structures concernées, entre 2018 et 2023.

5. Mise en place et préparation des ouvrages de prélèvement de gaz du sol

5.1. HYGIÈNE, SÉCURITÉ ET ENVIRONNEMENT

Avant tout travaux de forage, une Demande de Renseignements (DR), Déclaration de projet de Travaux (DT), et une Déclaration d'Intention de Commencer les Travaux (DICT) doivent être adressées au préalable aux gestionnaires de réseaux éventuels, conformément à la législation en vigueur. Ces dispositions sont détaillées dans le Décret n°2014-627 du 17 juin 2014 relatif aux travaux effectués à proximité des réseaux de transport et de distribution. Les formulaires de déclaration CERFA sont fournis par le biais de l'arrêté du 15 février 2012 modifié par l'arrêté du 12 janvier 2016.

Lors de la réalisation de forages sur des sites pollués, des précautions spécifiques doivent être prises concernant l'hygiène et la sécurité. Ces précautions concernent les risques suivants :

- risques chimiques (exposition aux produits en phase, dégazages, etc.),
- risques incendie/explosion (dégazage, phosphore, etc.),
- risques mécaniques (sondeuse, bâtiments délabrés sur une friche, etc.),
- risques radioactifs,
- risques bactériologiques.

Le guide ADEME-INRS (2002) « Protection des travailleurs sur les chantiers de réhabilitation de sites pollués » présente les consignes à suivre lors de travaux sur des sites pollués.

Tous les déchets doivent être gérés conformément à la réglementation en vigueur.

5.2. OUVRAGES PERMANENTS - PIÉZAIRES

5.2.1. Création et équipement d'un piézair

Afin d'implanter un piézair, il est recommandé de suivre les principales étapes suivantes :

- 1- Réaliser un sondage à sec jusqu'à la profondeur souhaitée à l'aide d'un carottier sous gaines ou à l'aide d'un carottier (à gouge) à fenêtre ouverte. Le trou de forage a généralement un diamètre de 50 à 80 mm. L'utilisation de tarières est à éviter dans les sols dont la nature est favorable à un risque de colmatage lors de la foration.
- 2- Équiper le forage à l'aide :
 - d'un tubage plein de la surface jusqu'à la zone crépinée,
 - d'un tubage crépiné situé dans l'horizon souhaité,
 - d'un bouchon de fond.

Le diamètre intérieur du tube est généralement compris entre 25 mm (1 pouce) et 50 mm (2 pouces) selon le type d'ouvrage.

Une hauteur comprise entre 0,5 et 1 m pour la zone crépinée est généralement appliquée.

Rappel : Il est recommandé de placer le haut de la crépine au minimum à 1 m de profondeur, et de placer le bas de la crépine au moins à 1 m au-dessus du niveau des eaux souterraines.

D'une manière générale, il est préférable d'orienter l'implantation des zones crépinées en fonction de la lithologie (afin de capter les gaz du sol dans le même horizon), et non uniquement de la profondeur. Les prélèvements de gaz du sol à une profondeur unique, ne tenant pas compte de la lithologie peuvent conduire à des difficultés d'interprétation des résultats.

Le choix du matériau de ce tube et du bouchon de fond de puits est fonction de la nature des substances recherchées. Pour la recherche des COV, il est recommandé de privilégier des matériaux inertes, comme l'acier, l'innox, le PEHD (matériau actuellement employé en standard), le PTFE (téflon® ; polytétrafluoroéthylène) ou le nylon.

Dans le domaine des sites et sols pollués, le retour d'expérience a montré que le PVC est à proscrire en cas de pollution aux COHV, afin d'éviter les risques d'adsorption ou de désorption de composés volatils sur les tubages. Par mesure de précaution, et en l'absence d'information contradictoire, cette recommandation est étendue aux prélèvements d'air. Si ce matériau venait à être utilisé, son absence d'interférence devrait être justifiée dans le rapport détaillé d'investigation.

Afin de s'affranchir des risques de contamination croisée et des problèmes d'étanchéité de l'ouvrage, les différents tubages doivent être assemblés par filetage uniquement (l'utilisation de colle ou de ruban adhésif est à proscrire).

Si le tubage ne s'étend pas jusqu'à la base du forage (exemple : forage de 4 m de profondeur dans lequel un tubage de 3,5 m est inséré), la zone de prélèvement risque de ne pas être maîtrisée, des remontées de poussières pourraient être observées. Pour ces raisons, un remblaiement à base de bentonite doit être réalisé du fond du forage jusqu'au tubage. Ce remblaiement doit être suffisant pour garantir une bonne étanchéité.

- 3- Remplir la zone annulaire (espace entre le tubage et les parois du sondage) :
 - **Au niveau de la crépine :**
Avec des sables et graviers chimiquement inertes (non calcaires) et d'un diamètre supérieur aux ouvertures de la crépine, en s'assurant de l'absence de création de vide pendant le remplissage.

- **Au niveau du tube plein (entre le haut de la partie crépinée et la surface du sol) :**
 - En surface : au minimum 0,2 m de béton (ou de bentonite-ciment) pour assurer une bonne étanchéité et renforcer la partie supérieure de l'ouvrage ;
 - Pour le reste de l'espace annulaire autour du tube plein : coulis de bentonite-ciment ou un coulis de bentonite pure.

Remarque

Le déversement dans l'ouvrage de granules de bentonite suivi d'un arrosage depuis la surface ne garantit pas une bonne dilatation et donc une bonne étanchéité. Les coulis de bentonite ou de bentonite/ciment doivent être préparés et mélangés en surface avant leur introduction dans l'ouvrage.

- 4- Fermer le tubage à l'aide d'un capot hermétique, d'une valve ou d'un système étanche permettant de connecter ultérieurement le circuit de prélèvement.
Les piézairs doivent rester fermés et étanches entre les campagnes de prélèvement.
- 5- Les ouvrages doivent être munis d'une protection suffisante pour empêcher leur dégradation et le vandalisme ; ces ouvrages restent, en effet, des points d'infiltration dans le sol. Des mesures appropriées peuvent comprendre l'installation d'un couvercle fermant à clé fixé dans le béton (type bouche à clé). Les tubages peuvent aussi dépasser du niveau du sol afin de limiter les infiltrations d'eau, rendre les ouvrages plus visibles et plus faciles à identifier (la protection de l'ouvrage dépend du contexte d'intervention propre au site étudié).
- 6- L'identification des ouvrages sur site par des marquages permanents ou plaques gravées est à privilégier.

L'ouvrage, ainsi créé, permet soit de réaliser des mesures *in situ* des gaz du sol, soit de procéder à leur prélèvement (cf. partie 6 pour le détail des protocoles de prélèvement).

La Figure 11 présente un exemple d'implantation de piézair et la Figure 12 présente la coupe schématique d'un piézair conformément aux recommandations présentées précédemment.

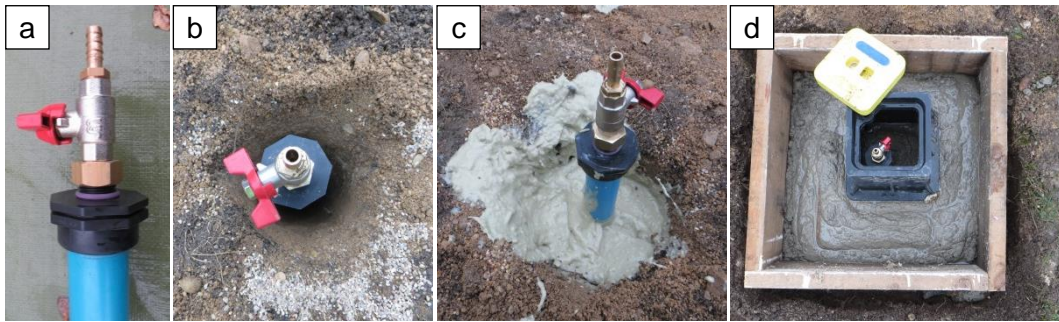


Figure 11 – Exemple d'implantation d'un piézair avec (a) une vanne étanche, (b) l'installation du tubage dans le puits foré, (c) l'étanchéité avec un coulis de bentonite, (d) le capot de protection

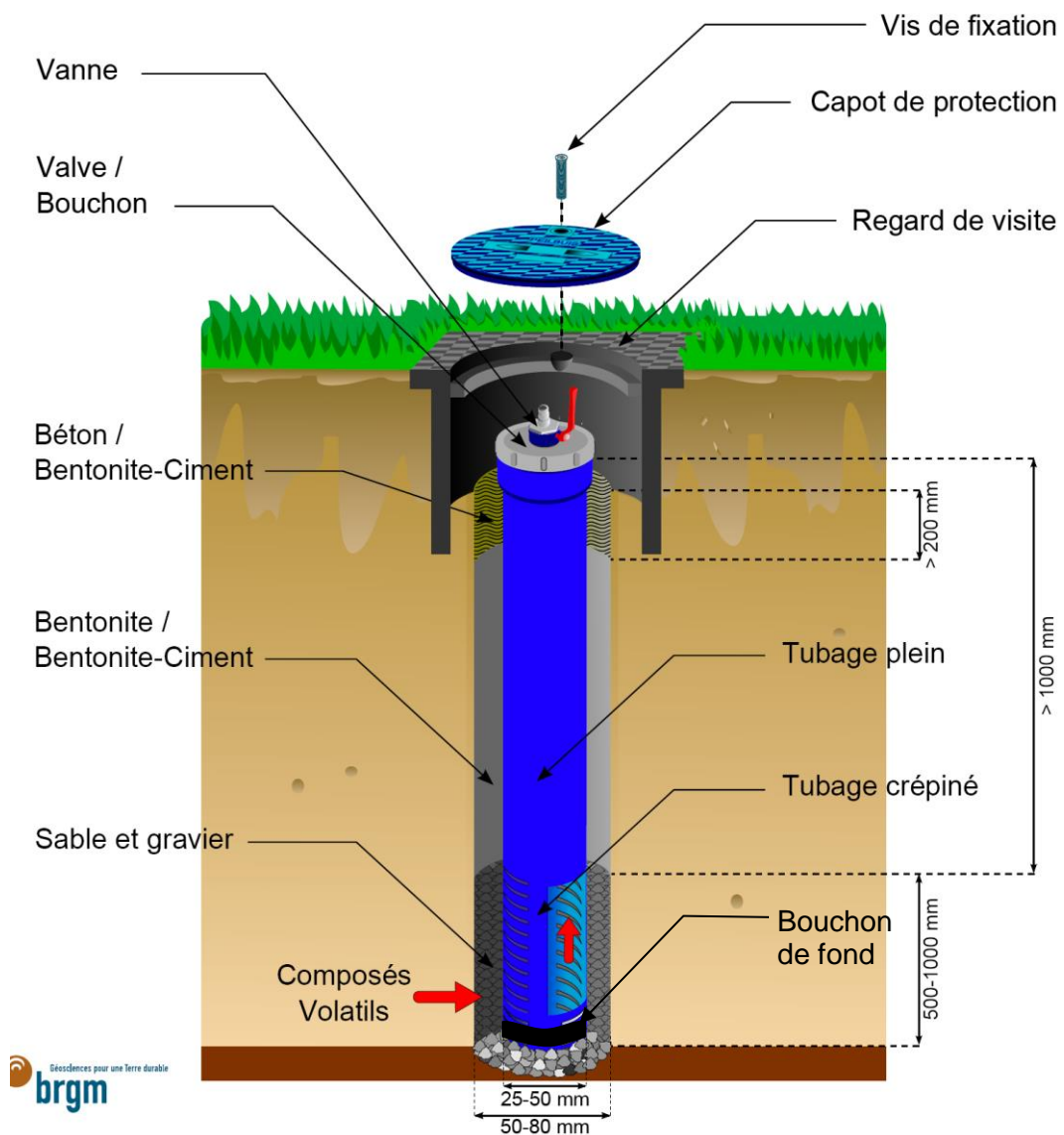


Figure 12 – Coupe schématique d'un piézair (unités en mm)

Recommandations :

- **Attendre une période d'au moins 24 heures après l'installation du piézair avant la réalisation des premiers prélèvements.** Ce temps d'attente est nécessaire, afin d'obtenir une stabilisation du milieu suite à la perturbation engendrée par le sondage, et ainsi avoir un prélèvement représentatif du milieu non perturbé. Cette durée minimum pourra être rallongée en fonction de la nature des sols et de la méthode de sondage employé.
- **Privilégier les lubrifiants minéraux lors du graissage des tubes du carottier** (éviter les graisses organiques), afin de s'affranchir des risques de contamination liés aux lubrifiants ou solvants organiques contenant des composés organiques volatils.
- **Laver les outils utilisés avec de l'eau** provenant du réseau d'eau potable (a minima à la brosse et au chiffon) **entre chaque sondage**, afin d'éviter toute contamination lors des opérations de forage.
- Prélever des échantillons de sols lors de la création du piézair (notamment à l'emplacement envisagé de la zone crépinée), afin de caractériser les sols au droit de l'ouvrage et ainsi étudier les corrélations entre les teneurs mesurées dans les sols et les concentrations mesurées dans les gaz du sol. La connaissance de certains paramètres (carbone organique total, granulométrie,...) du sol est également nécessaire si une modélisation des transferts doit être réalisée.
- L'utilisation de piézomètres pour les prélèvements de gaz du sol n'est pas recommandée, en raison de multiples sources de perturbation possibles (dégazage directement depuis les eaux souterraines, humidité importante dans l'air de l'ouvrage, non prise en compte de la perméabilité des terrains à l'air...).
- Réaliser des piézairs à proximité de piézomètres (en veillant à éviter des impacts d'un ouvrage sur l'autre), afin d'appréhender la qualité de milieux différents. Cela permet aussi de vérifier la concordance ou la déconnexion de panaches de polluants.

5.2.2. Mise en place d'ouvrages de prélèvements des gaz du sol à différentes profondeurs

En fonction du contexte du site d'étude et des objectifs des investigations, il peut être nécessaire de réaliser des prélèvements de gaz du sol à différentes profondeurs. Il se pose alors la question de la configuration des piézairs.

La Figure 13 présente les 3 principales configurations pour la mise en place d'ouvrages de prélèvements des gaz du sol à différentes profondeurs.

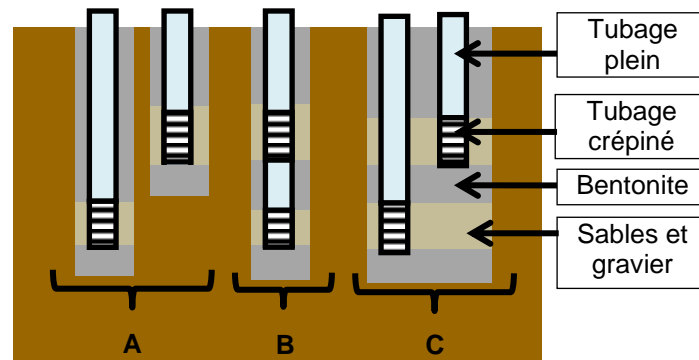


Figure 13 – Types de piézajets pour des investigations à différentes profondeurs d'après [CITYCHLOR, 2013]

Le type d'installation le plus couramment rencontré est :

- **Type de piézajet A** : réalisation de plusieurs piézajets, chacun installé dans son propre forage et chacun étant crépiné à une profondeur spécifique. Ce type d'installation est également dit en « flute de pan » comme lors de l'application du même principe avec des piézomètres.

Deux autres types d'installation sont possibles mais plus rarement mises en œuvre (en raison de la complexité de mise en place et de la maîtrise technique qu'elles supposent) :

- **Type de piézajet B** : piézajet constitué d'un puits unique et d'un tube unique avec deux tronçons crépinés distincts. Les zones crépinées (d'une hauteur maximale de 1 m et implantées chacune dans une lithologie spécifique) sont séparées par un tronçon de tube plein, pourvu d'un bouchon de bentonite dans l'espace annulaire, sur une hauteur a minima de 0,5 m, afin de garantir une bonne étanchéité. Lors de l'échantillonnage, les deux zones crépinées sont isolées l'une de l'autre à l'aide d'un système d'obturation gonflable (également appelé « packers »). Lors du choix et de l'utilisation de ces obturateurs gonflables, une attention particulière doit être apportée afin d'éviter tout matériau susceptible d'émettre des composés volatils et d'assurer une étanchéité parfaite.

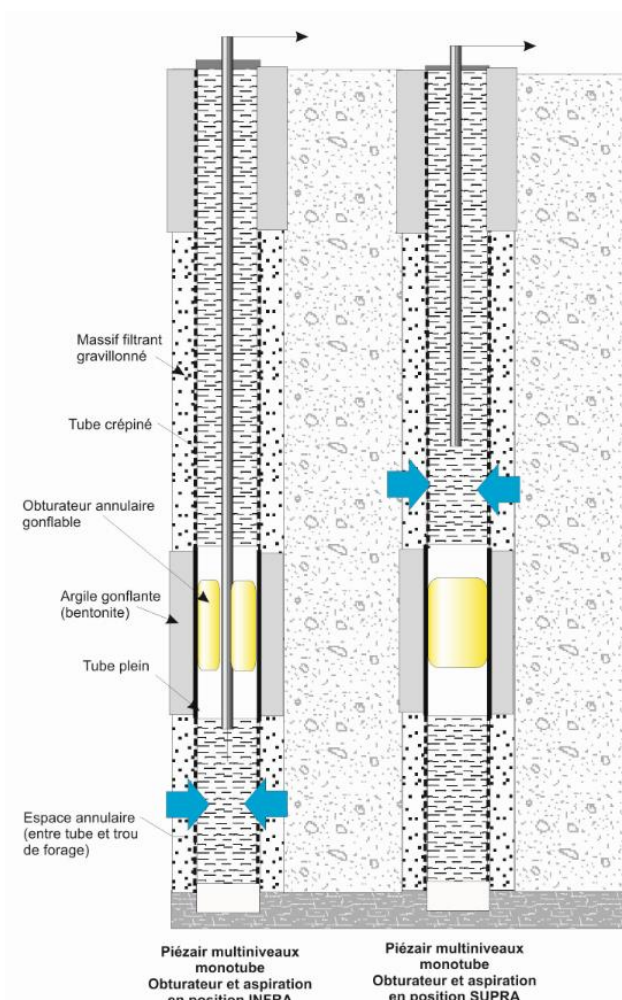


Figure 14 – Illustration de la mise en place d'obturateurs gonflables simples et annulaires (source : BRGM)

- **Type de piézair C** : plusieurs tubages (avec un maximum de quatre afin d'éviter des défauts d'étanchéité autour des tubes) sont installés dans un forage unique avec des zones crépinées à différentes profondeurs. Les zones crépinées (d'une hauteur maximale de 1 m et implantées dans une unique lithologie) sont séparées par de la bentonite d'une épaisseur minimum de 0,5 m, afin de garantir une bonne étanchéité entre les horizons à échantillonner.

Remarques :

- Dans le cas d'utilisation d'obturateur gonflable, le diamètre de l'ouvrage de prélèvement doit être suffisant (généralement ≥ 65 mm) pour permettre l'utilisation et l'installation de ces équipements.
- En cas de multiples niveaux crépinés, des obturateurs gonflables simples (obturation totale de la section du piézair) ou annulaires (obturant la section du piézair tout en permettant le passage de tubages) peuvent être utilisés, afin d'isoler les différentes sections et permettre le prélèvement d'air (cf. Figure 14). Une attention particulière doit être apportée pour garantir l'étanchéité entre les différentes crépines.

- Au regard des résultats obtenus dans le cadre des projets CityChlor et Caracitychlor, les designs A et C semblent être les plus pertinents pour la mise en œuvre de prélèvements multi-niveaux (certaines limites du design B ayant été révélé, notamment vis-à-vis de l'étanchéité du packer ou liées à la nature / faciès du terrain). L'acquisition de retours d'expériences complémentaires, sur d'autres sites pilotes et donc avec des contextes différents (lithologies, niveaux de contamination, profondeur des ouvrages, espacement des intervalles crépinés...) permettrait d'apporter des informations complémentaires vis-à-vis de la performance de ces designs.
- Dans le cas d'essais d'extraction à débit important et/ou de prélèvements de longue durée, le rayon d'action (vertical et horizontal) de chaque zone crépinée doit être déterminé en considérant le débit d'échantillonnage qui sera appliqué.

Les distances entre les zones crépinées ainsi que l'épaisseur de la bentonite seront adaptées aux rayons d'influence, afin d'éviter la création de court-circuit entre les différentes zones lors de l'échantillonnage.

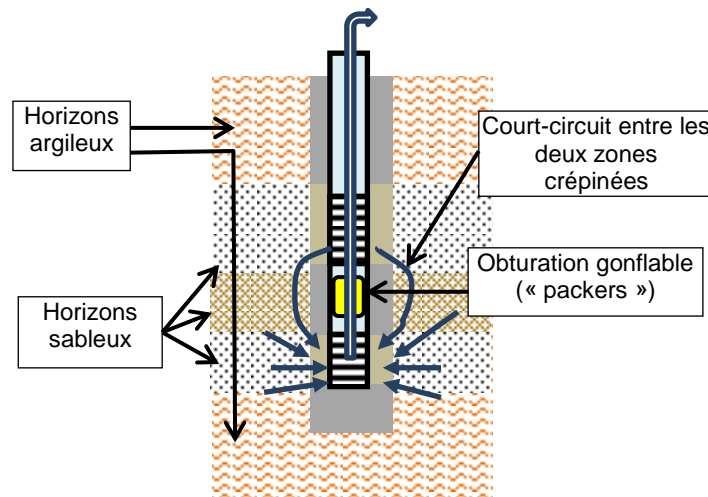


Figure 15 – Illustration d'un court-circuit entre deux zones crépinées insuffisamment espacées lors d'un pompage sur un piézomètre de type B (avec packer isolant les deux zones crépinées)

5.3. OUVRAGES PERMANENTS – AIR SOUS DALLE

Les prélèvements d'air sous dalle permettent de prélever l'air présent directement sous les fondations et radiers d'un bâtiment. Ces types d'ouvrages permanents ou temporaires sont principalement utilisés en parallèle de prélèvements réalisés dans les milieux d'exposition situés au-dessus de ces dalles (air intérieur), afin de déterminer la contribution des gaz situés sous la dalle aux concentrations mesurées dans l'air intérieur. Ces ouvrages sont également couramment utilisés dans le cadre de la recherche de sources « sols » de pollutions sous un bâtiment.

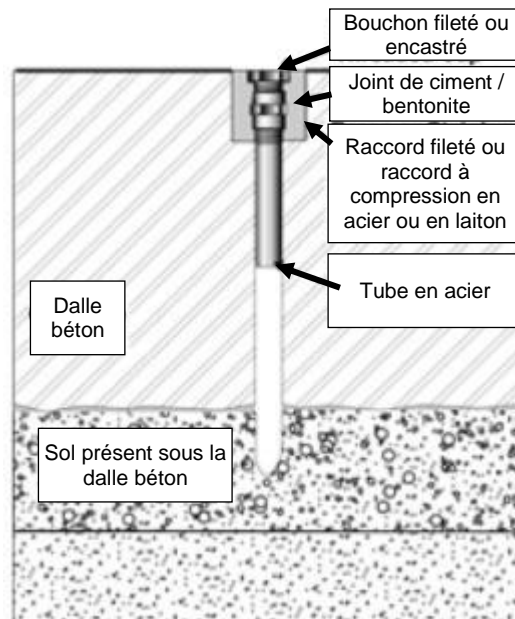


Figure 16 – Schéma de principe d'un Sub-Slab (source : US-EPA)

Afin d'implanter un point de prélèvement d'air sous dalle, il est recommandé de suivre les étapes suivantes :

1- Règles de sécurité :

- Balisage de la zone de travail, préparation du matériel et de la zone de travail (disposer d'un aspirateur pour récupérer les poussières qui seront émises) ;
- Vérification de l'absence de passage de réseaux à l'emplacement envisagé ;
- Vérification de l'absence d'amiante dans les revêtements / matériaux à percer ;
- Vérification de l'absence de cuvelage sous les dalles à percer ;
- Valider les implantations et définir les modalités de remise en état avec un représentant du maître d'ouvrage ;
- Établissement des documents administratifs nécessaires et adaptés à l'intervention (plans de prévention par exemple) ;

2- Percement du revêtement de surface (dalle) au moyen d'un perforateur jusqu'à une profondeur de 10 à 20 cm minimum sous la dalle ;

3- En cas de plusieurs prélèvements d'air sous dalle réalisés dans une même zone, il est recommandé d'espacer les différents points d'au moins 1 m ;

4- Vérification de l'absence de vide sanitaire sous la dalle (si cette information n'avait pu être obtenue précédemment : lors de l'étude

bibliographique, lors de l'analyse des plans du bâtiment, lors de l'élaboration du plan de prévention...);

- 5- Mise en place d'une sonde crépinée filtrante ou d'un flexible dans le trou ainsi créé. Dans le cas de l'utilisation d'un flexible, celui-ci ne doit pas entrer en contact avec les sols et doit rester dans l'épaisseur de la dalle, afin d'éviter de pomper des particules de sols lors du prélèvement ;
- 6- Obturation étanche de l'espace annulaire avec des matériaux inertes de types pâte (résines ou polymères inertes) / ciment / bentonite ou avec un robinet à gaz ;
- 7- Mise en place d'un capillaire en PTFE (téflon® ; polytétrafluoroéthylène) ou tout autre matériau inerte entre la « sonde crépinée » et le dispositif de prélèvement.

L'ouvrage ainsi créé, permet soit de réaliser des mesures *in situ* de l'air accumulé sous la dalle, soit de procéder à son prélèvement (cf. partie 6 pour le détail des protocoles de prélèvement).

Les ouvrages de prélèvement d'air sous dalle doivent rester fermés et étanches en dehors des phases de prélèvement.

L'état des dalles à proximité du prélèvement d'air sous dalle doit être inspecté, afin de déterminer si des voies de transfert préférentielles (par exemple des fissures, passages de réseaux, etc.) sont présentes. Si des voies de transfert préférentielles sont identifiées près du prélèvement d'air sous dalle, celles-ci devront être colmatées (avec de la bentonite par exemple) avant le début de l'échantillonnage.

Remarque

À l'issue de l'installation de l'ouvrage permanent, il est recommandé la réalisation d'un Procès-Verbal (PV) de réception contradictoire entre un représentant du maître d'ouvrage et l'intervenant ayant réalisé les opérations.

5.4. OUVRAGES TEMPORAIRES

5.4.1. Cannes gaz

Les cannes gaz sont des outils permettant la création rapide d'ouvrage de prélèvement de gaz du sol à faible profondeur (généralement entre 1 et 2 m).

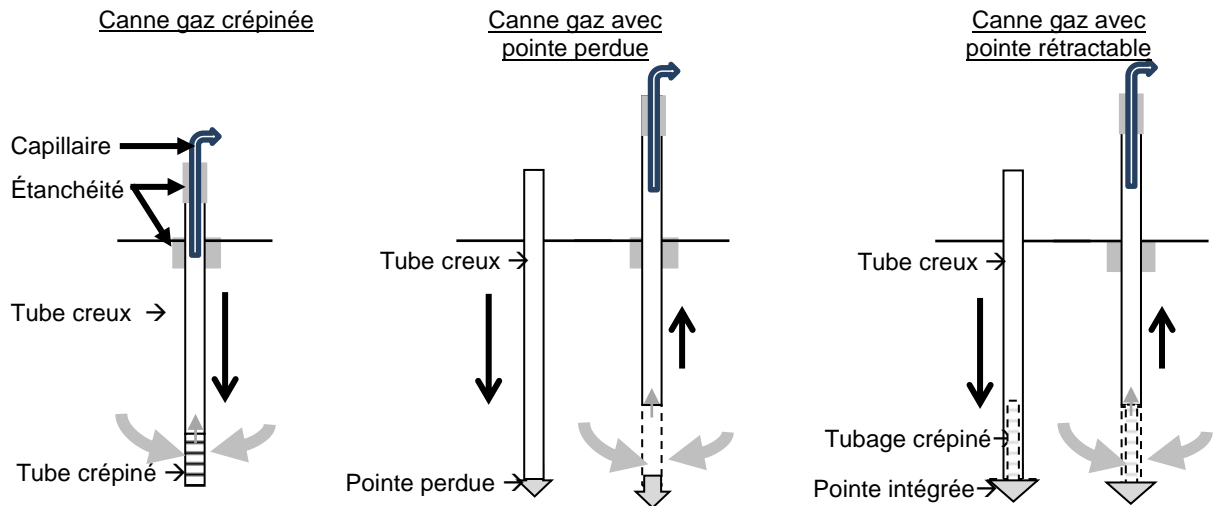


Figure 17 – Illustration des différents types de cannes gaz

Plusieurs formats de canne gaz sont possibles :

- **Canne gaz crépinée**

Ce type de canne gaz est constitué d'une canne métallique creuse d'un diamètre intérieur inférieur à 5 centimètres, d'une longueur supérieure à 1 m et crépinée sur les 5 derniers centimètres.

Lors de sa mise en place, cette canne est enfoncée dans le sol jusqu'à une profondeur minimum de 1 m.

Un capillaire (en PTFE (téflon®; polytétrafluoroéthylène) ou tout autre matériau inerte) est alors introduit dans la canne gaz et l'espace annulaire de surface est obturé de façon étanche avec un matériau inerte.

Ce capillaire est ensuite raccordé au dispositif de mesure ou de prélèvement.

- **Canne gaz avec pointe perdue et création de chambre de prélèvement**

Ce type de canne gaz est constitué d'une canne métallique creuse d'un diamètre intérieur inférieur à 5 cm, d'une longueur supérieure à 1 m et d'une pointe dédiée (perdue).

Lors de sa mise en place, cette canne est enfoncée dans le sol jusqu'à une profondeur minimum de 1 m. La canne, alors désolidarisée de la pointe, est remontée de 5 à 10 cm créant ainsi une chambre de prélèvement des gaz du sol.

Un capillaire (en PTFE (téflon® ; polytétrafluoroéthylène) ou tout autre matériau inerte) est alors introduit dans la canne gaz et l'espace annulaire de surface est obturé de façon étanche avec un matériau inerte.

Ce capillaire est ensuite raccordé au dispositif de mesure et/ou de prélèvement des gaz du sol.

▪ **Canne gaz avec pointe rétractable**

Ce type de canne gaz est constitué d'une canne métallique creuse d'un diamètre intérieur inférieur à 5 cm, d'une longueur supérieure à 1 m et d'une pointe rétractable entourée d'un manchon à l'extrémité de la canne.

Lors de sa mise en place, cette canne est enfoncée dans le sol jusqu'à une profondeur minimum de 1 m. Après enfoncement, la canne alors désolidarisée de la pointe, est remontée de 5 à 10 cm créant ainsi une chambre de prélèvement des gaz du sol. La pointe reste ancrée dans les sols, et un tubage crépiné est libéré lors de la remonté du manchon.

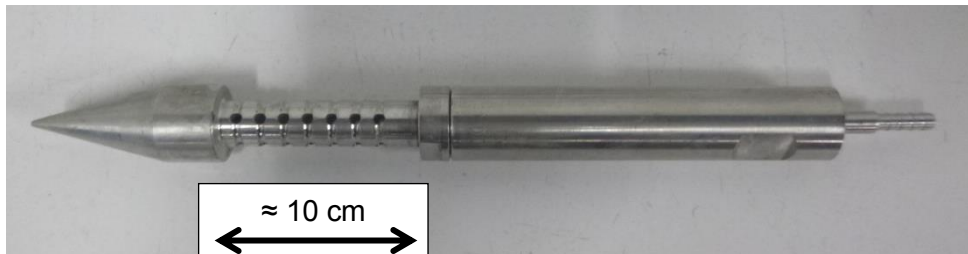


Figure 18 – Exemple de canne gaz à pointe rétractable

Un capillaire (en PTFE (téflon® ; polytétrafluoroéthylène) ou tout autre matériau inerte) est alors introduit dans la canne gaz et l'espace annulaire de surface est obturé de façon étanche avec un matériau inerte.

Ce capillaire est ensuite raccordé au dispositif de mesure ou de prélèvement.

Remarques concernant les cannes gaz

- La lithologie du site doit être connue préalablement à la mise en place de ce type de dispositif, afin de bien identifier la nature des sols et la pertinence de la profondeur ciblée ;
- Ce type d'outils n'est pas approprié pour les sols de type remblais grossiers, graviers, galets,... en raison de risques de refus lors de l'installation et de problème d'étanchéité ;
- Dans des sols très compacts et/ou argileux, des problèmes d'obturation peuvent être rencontrés, ce qui empêche le prélèvement des gaz du sol (mise en défaut du dispositif de pompage) ;
- Une attention particulière est à apporter lors du fonçage de la canne, afin d'éviter la création d'un espace annulaire le long de la canne. Dans tous les cas, l'étanchéité entre le tubage et le terrain doit être assurée, afin d'éviter tout échange et pompage d'air atmosphérique ;

- Laver les cannes gaz utilisées avec de l'eau provenant du réseau d'eau potable (*a minima* à la brosse et au chiffon) entre chaque sondage, afin d'éviter toute contamination lors de la réutilisation de la canne sur un autre point de prélèvement.

5.4.2. Chambre à flux pour la caractérisation des transferts des gaz du sol

Cette méthode, généralement utilisée dans le cadre de screening, (à l'aide d'un analyseur en ligne) permet d'évaluer les flux de transfert de composés volatils à l'interface sol/atmosphère ou dalle de béton / atmosphère.

La chambre à flux est posée en surface du sol ou de la dalle béton par l'intermédiaire d'un joint pour empêcher la fuite des vapeurs et l'introduction d'air atmosphérique dans la chambre. Afin d'améliorer l'étanchéité, une masse de lestage peut être placée sur la chambre.

La chambre à flux doit être constituée d'un matériau inerte et non adsorbant et comporter des ports d'échantillonnage, afin de relier le système d'échantillonnage approprié à la chambre de flux sol-gaz.

Trois méthodes de mesures de flux sont principalement utilisées (avec ou sans accumulation et avec ou sans recirculation) :

- 1- Méthode par accumulation sans recirculation avec un analyseur de terrain (PID par exemple), les mesures étant réalisées par piquage ponctuel au sein de la chambre à flux ;
- 2- Méthode par accumulation avec recirculation et un suivi de la concentration en continu à l'aide d'un appareil à lecture directe (PID par exemple) au sein de la chambre à flux ;
- 3- Méthode sans accumulation avec recirculation et adsorption en continu sur un support¹¹ ensuite analysé au laboratoire.

Des mesures en continu peuvent être réalisées au moyen d'analyseurs en ligne, induisant une légère dépression continue en raison du pompage. Dans ce cas, les gaz émis à partir de la surface élémentaire sont pompés, envoyés à l'analyseur et réinjectés dans la chambre, créant ainsi un flux de recirculation. De cette façon, l'atmosphère dans la chambre fermée est enrichie avec des composés volatils, jusqu'à ce qu'il atteigne une asymptote à l'équilibre avec la concentration de l'air confiné.

Le flux local peut être déduit de la mesure de l'enrichissement de l'atmosphère intérieure de la chambre, le temps d'échantillonnage et la géométrie de la chambre. Le flux doit être suffisamment faible, afin d'éviter la création de

¹¹ la mise en série d'un support actif de type tube à adsorption en aval d'un analyseur de gaz est à proscrire car certains procédés de mesure peuvent dégrader les molécules recherchés (cas des analyseurs infrarouge (IR))

dépression au sein de la chambre à flux tout en restant compatible avec les limites de quantification recherchées.

Pour les mesures à l'aide des analyseurs de terrain de type PID, le débit est généralement de l'ordre de 0,5 L/min. Pour les mesures en circuit fermé, le débit ne dépasse généralement pas 1 L/min, et peut être plus faible en fonction des débits recommandés pour les supports.

Lors des mesures de flux, il est recommandé de mesurer le débit de recirculation de l'air *a minima* avant le démarrage de la mesure et en fin de mesures.



Chambre INERIS à flux® sur dalle béton avec suivi des concentrations en gaz au PID (source : INERIS)



Chambre à flux Odoflux (Odotech) sur sols à nu avec pompage des gaz (source : projet Fluxobat)

Figure 19 – Illustrations de chambres à flux sur dalle béton ou sol à nu

Remarque

Les variations de pression atmosphériques constituant l'un des phénomènes ayant le plus d'influence sur la variation des flux, la mesure de ce paramètre est donc particulièrement importante pour ce type de prélèvement (cf.2.3.2 et 0).

Pour plus d'information sur les mesures de flux, le guide [Fluxobat, 2013] présente dans le détail les mesures des flux à l'interface sol-atmosphère ou dalle-atmosphère.

5.4.3. Technique du « Sub-slab » (air sous dalle)

Les sub-slab temporaires sont mis en place comme précisé dans le paragraphe 5.3.

Préalablement au percement des dalles, il est recommandé de valider avec un représentant du maître d'ouvrage les localisations des points de prélèvements ainsi que les modalités de remise en état.

À l'issue du prélèvement d'air sous dalle, suite à la remise en état de la dalle, il est recommandé la réalisation d'un Procès-Verbal (PV) de réception contradictoire entre un représentant du maître d'ouvrage et l'intervenant ayant réalisé les opérations.

POINT D'ATTENTION : Après le prélèvement, le trou créé sera rebouché de façon étanche, afin de ne pas constituer une voie de transfert préférentielle entre l'air sous la dalle et l'air intérieur. Les matériaux utilisés pour colmater le trou de façon étanche doivent permettre de garantir la pérennité de ce colmatage en prenant en compte le vieillissement des matériaux (privilégier des matériaux à base de mélange d'argiles / ciments, de résines...).

5.5. PRÉPARATION DES OUVRAGES DE PRÉLÈVEMENT

5.5.1. Contrôle d'étanchéité

Lors de la mise en place de la chaîne de prélèvement, un flexible est relié à l'ouvrage de prélèvement puis raccordé au dispositif de mesure ou de prélèvement.

Préalablement à la mesure ou au prélèvement, il est recommandé de réaliser un test d'étanchéité qui permettra de garantir que l'air prélevé ou mesuré provient bien des gaz du sol et non de l'air ambiant qui pénètre dans l'ouvrage via un défaut d'étanchéité.

Différents tests d'étanchéité peuvent être mis en œuvre :

- Le plus simple et fréquemment utilisé consiste à pomper des gaz du sol et à mesurer des concentrations en O₂ et CO₂ (il s'agit du test le plus couramment rencontré). Si les concentrations mesurées sont comparables à celles de l'air ambiant (O₂ ≈21% et CO₂ ≈ 400 ppmv pour l'air extérieur), une entrée d'air dans l'ouvrage de prélèvement est probable et l'étanchéité du point de prélèvement doit être refaite.

D'autres types de tests existent mais sont plus rarement mis en œuvre (en raison de la complexité du protocole opératoire et de la technicité nécessaire), notamment :

- Pompage de la totalité de l'air présent dans l'ouvrage puis arrêt du pompage (en maintenant le système fermé et étanche). La dépression ainsi créée dans l'ouvrage est alors mesurée et doit rester constante sur la même durée que la durée d'échantillonnage prévue, afin de garantir l'étanchéité de cet ouvrage.
- Utilisation d'un gaz traceur : un gaz traceur « inerte » par rapport aux substances recherchées (hélium ou propane par exemple) est introduit en surface dans une cloche fermée et étanche placée autour de l'ouvrage de prélèvement. En cas de détection d'une concentration volumique en traceur inférieure à 10% du volume total, l'étanchéité de l'ouvrage sera jugée acceptable.

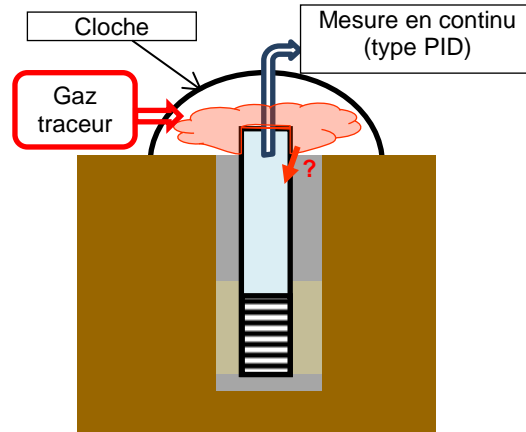


Figure 20 – Illustration d'un test d'étanchéité au gaz traceur

5.5.2. Étape de purge préalable au prélèvement

L'objectif des ouvrages de prélèvement est la mesure et/ou l'échantillonnage des gaz du sol. Ainsi, l'air prélevé doit être représentatif des gaz du sol du proche environnement de l'intervalle crépiné de l'ouvrage, et non pas de l'air stagnant présent dans la colonne de l'ouvrage.

Afin d'obtenir de l'air représentatif des gaz du sol, il est nécessaire de réaliser une purge complète de l'ouvrage. Cette purge doit être réalisée à un débit similaire à celui qui sera appliqué lors de l'échantillonnage ou de la mesure, afin d'éviter de solliciter trop fortement l'air des sols et risquer de créer des colmatages ou, au contraire, la création de voies de circulation préférentielles...

Le volume de purge peut être déterminé par une des deux méthodes suivantes :

- Purge de l'ouvrage jusqu'à la stabilisation du (ou des) paramètre(s) pertinent(s) mesuré(s) en continu (par exemple PID pour les COVs, O₂, CO₂, H₂S, humidité relative...). Cette méthode est celle assurant la meilleure efficacité de la purge.
- Détermination du volume mort présent dans l'ouvrage de prélèvement (ce volume est calculé à partir du diamètre intérieur et de la profondeur de l'ouvrage), puis pompage et extraction d'au minimum 5 fois le volume mort ;

6. Protocoles de prélèvements et de mesures des gaz du sol et d'air intérieur

6.1. HYGIÈNE, SÉCURITÉ ET ENVIRONNEMENT

Lors de la réalisation de prélèvements de gaz du sol et d'air intérieur sur des sites pollués, des précautions spécifiques doivent être prises concernant l'hygiène et la sécurité. Des procédures appropriées doivent être mises en place afin de prendre toutes les mesures qui s'imposent pour garantir la sécurité et protection de la santé des personnes et l'intégrité des biens. Ces précautions concernent notamment les risques suivants :

- Risques chimiques (exposition aux produits en phase pur ou à des concentrations élevées, dégazages, etc.) : le personnel en charge des opérations doit être formé sur les risques chimiques, et posséder les détecteurs de gaz adéquat.
- Risques liés aux espaces confinés : en cas de prélèvements réalisés dans des espaces confinés, une procédure appropriée doit être mise en place afin de protéger les travailleurs devant y pénétrer.

Le guide ADEME-INRS (2002) « Protection des travailleurs sur les chantiers de réhabilitation de sites pollués » présente les consignes à suivre lors de travaux sur des sites pollués.

Tous les déchets générés lors de l'intervention doivent être gérés conformément à la réglementation en vigueur.

6.2. PRÉPARATION DE LA CAMPAGNE DE CARACTÉRISATION

Les points clefs de la préparation d'une campagne de caractérisation sont repris ci-après avec si nécessaire les renvois vers les sections concernées :

- **La question initiale est-elle clairement établie et les objectifs ont-ils été clairement définis (cf. 3 pour les gaz du sol et cf.4 pour l'air intérieur)?**

La définition des objectifs du ou des prélèvement(s) a-t-elle été clairement établie ? S'agit-il d'une évaluation des expositions, de la compréhension des transferts, de l'identification des substances recherchées, d'une vérification de l'efficacité de mesures de gestion, d'un processus de surveillance... (cf. paragraphes 3.1 et 4.1).

- **La méthode choisie permet-elle de répondre à cette question initiale ?**

Les substances cibles et les référentiels de comparaison/interprétation ont-ils été clairement identifiés ? Les moyens métrologiques sont-ils adaptés ?

- ✓ choix des supports de prélèvements en fonction des substances visées et de l'objectif,
- ✓ prise de contact avec le fournisseur des supports de prélèvement et avec un laboratoire afin de déterminer les conditions spécifiques de mesures

(adsorption des composés volatils recherchés et compétition d'adsorption avec d'éventuels autres composés présents, gamme de débit acceptable, limite de quantification, interférences avec l'humidité, ...),

- ✓ détermination du débit de la pompe (dans le cas de prélèvements actifs) et définition de la durée de prélèvement (et donc le volume prélevé) en s'assurant que celui-ci est compatible avec le support choisi et est en cohérence avec les limites de quantification à atteindre au regard de l'objectif de l'étude.
- **Les stratégies d'échantillonnage spatial et temporel sont-elles définies ?** (cf. paragraphes 3.2, 3.3, 4.3 et 4.4)
- ✓ récolte des informations documentaires et historiques sur le site (pollution des sols ou/et des eaux souterraines, rapports d'études précédentes, caractéristiques du bâtiment, ventilation et conditions d'utilisation des bâtiments, ...),
 - ✓ il est nécessaire d'effectuer en amont de l'intervention pour les prélèvements, une visite des lieux. Cette visite permet notamment de valider les points de prélèvement pressentis (cf. paragraphe 4),
 - ✓ choix des points de prélèvements, de la durée de prélèvement et de la méthode de prélèvement (active ou passive) au regard de(s) objectif(s) de l'étude.
- **La programmation de la campagne est-elle pertinente et en cohérence avec les objectifs initiaux ? en conditions majorantes (été/hiver) ou conditions d'occupation habituelle... ?** (cf. paragraphe 6.3)
- ✓ application du même protocole de prélèvement entre différentes campagnes (méthode et supports sélectionnés, débit et volume du prélèvement) sauf si le protocole initial a permis de mettre en évidence des dysfonctionnements ou des défauts (problème de saturation, de perçage, de compétition d'adsorption, etc.).

6.3. MESURES PRÉLIMINAIRES

Lors des prélèvements de gaz du sol ou d'air intérieur, des mesures de différents gaz sur site doivent être réalisées afin d'orienter la localisation des prélèvements, de suivre un paramètre en continu, d'adapter les paramètres de prélèvement, d'évaluer les interférences...

6.3.1. Matériel de mesure de gaz possible

Le tableau ci-après présente différents types d'appareil de mesure de gaz qui sont classiquement utilisés.

Tableau 6 – Méthodes d'analyse des gaz sur site d'après [ATTENA, 2013]

Méthode / Données récapitulatives	Composés analysés	Screening et identification source / composé	Niveau de technicité	Temps d'analyse (min)	Limitations
Tubes réactifs colorimétriques	Liste très étendue : HCT, BTEX, COHV, CO ₂ ,...	Screening : *** Identification : * à **	Faible	5 à 20	Nombreuses réactions croisées possibles Précision limitée
Appareil à photoionisation (PID)	BTEX, COHV, composés soufrés, oxygénés,...selon l'énergie d'ionisation de la lampe	Screening: *** Identification : * à ** : selon le type de lampe utilisé	Faible à moyenne, selon calibration	< 1	Réaction non spécifique
Mesure par infrarouge (IR)	Méthane, indice HC totaux, CO ₂	Screening : *** Identification : * à ** : selon nombre de canaux IR utilisés	faible à moyenne, selon calibration	<1	Réponse non spécifique mais moins étendue que le PID
Appareil à ionisation de flamme (FID)	BTEX, COHV, HCT, méthane	Screening : *** Identification : *	Moyenne (calibration régulière nécessaire)	<1	Réponse non spécifique mais moins étendue que le PID
Appareil à détection photo-acoustique IR	PCE, TCE, CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, NH ₃	Screening : ** Identification : ** à ***	Moyenne (mesure plus complexe)	Selon le nombre de gaz analysés (1 minute pour 5 gaz)	Réponse spécifique
Chromatographe de terrain	En fonction des détecteurs utilisés	Screening : * Identification : ***	Élevée	10-60	Réponse spécifique
Analyseur de mercure	Mercure (Hg)	Screening : * Identification : ***	Moyenne (mesure plus complexe)	5-10	Réponse spécifique
Détecteurs à cellules électrochimiques	Liste étendue: CO, CO ₂ , H ₂ S, CH ₄ , O ₂ , SO ₂ , PH ₃ , NH ₃ , NO ₂ , HCN, Cl ₂ , ClO ₂ , O ₃ .	Screening : *** Identification : **	Faible	<1	Réponse spécifique Réactions croisées possibles
Analyseurs thermo-hygrométrique	Température (°C) et humidité relative (%)	Screening : * Identification : *	Faible	<1	Fournit des informations sur les propriétés de l'air
Réponse spécifique = propre à un ou des composés			niveau de précision par rapport à l'objectif :		
			* : bon		
Réponse non spécifique = valeur semi quantitative pour un ensemble de substances			** : assez bon		
			*** : très bon		

6.3.2. Mesures d'orientation sur site

Dans le cadre d'investigations sur site, des détecteurs de gaz peuvent être utilisés afin de réaliser un « screening » des concentrations dans le milieu étudié. Par exemple, dans un contexte de pollution en composés organiques volatils, un screening peut être réalisé dans les gaz du sol à l'aide d'un PID¹² ou d'un FID couplé à des cannes gaz, selon un maillage resserré afin d'évaluer la localisation des zones présentant les plus fortes réponses. Cette évaluation pourra permettre de bien orienter la localisation d'un ouvrage permanent de type piézair. Dans l'air intérieur, le même principe peut être appliqué, afin de déterminer, d'une part, les pièces présentant le plus d'indice de contamination et/ou mettre en évidence des zones de transfert privilégié (traversées de dalle par des réseaux divers, joints de dilatation des dalles...) et, d'autre part, les vecteurs d'émissions potentiels (gaz à l'intérieur des canalisations, des gaines, ...).

Cette méthode peut être réalisée à l'aide de détecteurs ayant des réponses spécifiques à un seul gaz (tubes réactifs colorimétriques, analyseur de mercure, détecteurs à cellules électrochimiques), ou avec des détecteurs ayant une réponse globale pour plusieurs composés (PID, FID...) (cf. Tableau 6).

6.3.3. Mesures préalables aux prélèvements

Différentes mesures sont à réaliser sur site afin de pouvoir ajuster au mieux les paramètres de prélèvements et limiter les risques de saturation liés à de fortes concentrations ou à de forts taux d'humidité :

- **Mesures semi quantitatives (pour les gaz du sol, l'air intérieur et/ou extérieur)** : préalablement au prélèvement, des mesures doivent être réalisées à l'aide d'un appareil permettant la mesure des composés suspectés et/ou recherchés. Les appareils multi gaz (O₂ (permet d'observer un colmatage ou une mauvaise étanchéité d'un ouvrage de prélèvement de gaz du sol), CO₂, H₂S, CH₄, CO) et PID (analyse semi-quantitative des substances volatiles potentiellement présentes dans l'air) peuvent être utilisés. Le Tableau 6 présente différents types d'instruments de mesures avec leurs caractéristiques principales et les composés analysés. L'application de ce protocole est importante pour vérifier si des gaz sont d'ores et déjà identifiés avant l'échantillonnage et, le cas échéant, s'il y a lieu d'ajuster les temps de pompage. Des tubes colorimétriques (type tubes Draëger) peuvent également être utilisés pour des composés qui ne seraient pas détectables au multi gaz ou au PID.
- **Température et humidité (essentiellement pour les gaz du sol)** : il est également fortement recommandé de mesurer la température et l'humidité des gaz du sol préalablement aux prélèvements, afin notamment d'évaluer le risque d'interférence de l'humidité sur l'adsorption de composés volatils en cas d'utilisation de tube adsorbant. La mise en place d'un filtre à humidité pourra être réalisée sous réserve de vérifier au

¹² Les mesures réalisées à l'aide d'un PID n'ont qu'une valeur indicative et ne doivent pas servir pour une évaluation de risques.

préalable sa compatibilité au regard des composés recherchés (ex : ne pas utiliser de gel de silice pour le dosage des COHV) (cf. parties 6.4.4 et 7.4.4).

Le prélèvement de gaz du sol avec des conditions de basses températures ($<0^{\circ}\text{C}$) peut entraîner des phénomènes de condensation à certains points froids de la chaîne de prélèvement avec le passage des gaz du sol humides, à une température plus élevée que l'air ambiant.

Afin de limiter cet effet, il pourrait être envisagé l'isolation ou le maintien de la ligne de prélèvement à une température équivalente à celle des gaz du sol (couverture, protection des supports par des tubes isolants,...).

La Figure 21 illustre la capacité de piégeage de l'humidité de différents supports utilisés pour le prélèvement d'air. L'humidité relative des gaz du sol pouvant être supérieur à 90 %, cela illustre la spécificité de ce milieu par rapport à l'air intérieur, et la nécessité de prendre en compte ce point particulier.

Remarque

Pour les gaz du sol, les mesures préalables aux prélèvements peuvent être réalisées soit directement dans l'ouvrage (en veillant à son étanchéité), soit dans une chambre de prélèvement étanche qui serait placée entre l'ouvrage et la pompe et qui permettrait ainsi le branchement simultané de plusieurs appareils ou sondes.

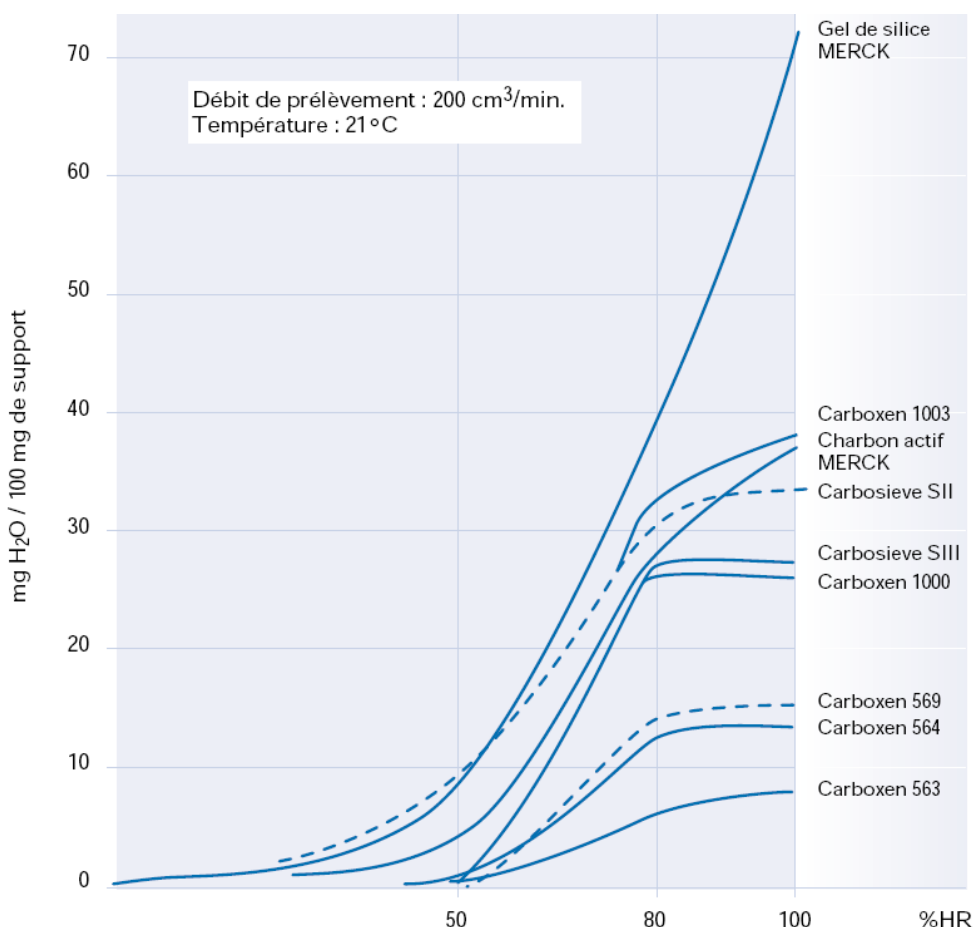


Figure 21 – Capacité de piégeage comparée de l'eau à 21°C pour plusieurs types de supports de prélèvement d'air [INRS, 2000]

La mesure des conditions météorologiques locales pendant les prélèvements est également essentielle pour déterminer si les prélèvements ont été réalisés dans des conditions minimisant ou majorant le dégazage des composés volatils.

Durant les prélèvements (température, pression barométrique, humidité relative, vitesse et sens du vent) sont à mesurer de préférence à l'aide d'une station météo. La pression atmosphérique et les précipitations dans la zone d'étude pendant les jours précédant les investigations doivent également être connus (cf. partie 2.3.2). Ces éléments peuvent être acquis à l'aide d'une station météo portative implantée sur site.

6.3.4. Mesures en continu

Des appareils existent pour la mesure en continu de la qualité de l'air intérieur / extérieur. Ils peuvent être utilisés en tant que mesures préliminaires pour permettre l'orientation des futures investigations mais également dans le cadre de la surveillance de la qualité de l'air intérieur / extérieur.

Ces appareils ne sont pas traités en détail dans ce document, ils sont toutefois cités pour information.

Des éléments sont disponibles dans [INERIS, 2008] et [INERIS, 2009] traitant du **tétrachloroéthylène**. [INERIS, 2009] et relatent notamment qu'un appareil de mesure en continu du tétrachloroéthylène a été testé afin d'obtenir rapidement

une information sur les concentrations en tétrachloroéthylène présentes dans les installations de nettoyage à sec ainsi que dans les locaux mitoyens, notamment dans les logements situés dans les étages supérieurs. Ce type de dispositif permet un suivi dynamique de la concentration grâce à un temps de réponse de l'appareil de l'ordre de quelques minutes au maximum. De tels dispositifs de mesure présentent en particulier un intérêt vis-à-vis de l'estimation des expositions aiguës des populations ou de l'étude des sources d'émission. Une synthèse des appareils disponibles sur le marché a été réalisée, référencant les principes de mesure, leurs avantages et inconvénients par rapport aux contraintes identifiées en rapport avec la problématique (gammes de concentrations variées, poids, sélectivité, facilité de mise en œuvre...), ainsi que leur coût [INERIS, 2009].

Concernant le **mercure gazeux**, [LCSQA-INERIS, 2011] a réalisé une étude ayant pour objectif de procéder à une série de tests en laboratoire et sur site afin de mettre en évidence les avantages/inconvénients de plusieurs analyseurs en provenance de constructeurs différents. Quatre analyseurs ont ainsi été testés (Tekran 2537A, Lumex RA915AM, Mercury Instruments UT3000, Lumex RA915+) et répondent positivement aux exigences concernant les caractéristiques métrologiques testées dans le cadre de cette étude. [LCSQA-INERIS, 2011] souligne qu'il est préférable de placer ces analyseurs dans un environnement stabilisé en température. À titre d'exemple le Lumex RA915+ permet de mesurer des gammes de concentrations comprises entre 0,2 et 2000 ng/m³ et sont compatibles avec les limites de quantification recherchées pour les sites et sols pollués et cohérentes avec la VTR.

Des appareils existent également pour mesurer le **benzène** d'une part (exemple : UT3000, Lumex 915AM...) et le **formaldéhyde** d'autre part (exemple : Interscan, Aero laser AL402...). Un retour d'expérience complémentaire est encore nécessaire pour la mise en œuvre de ce type de mesures et leur exploitation dans le cadre des sites et sols pollués.

6.4. LA CAMPAGNE DE PRÉLÈVEMENT

6.4.1. Sélection des types d'échantillonnage par rapport au contexte

Le schéma suivant clarifie la terminologie employée autour des prélèvements :

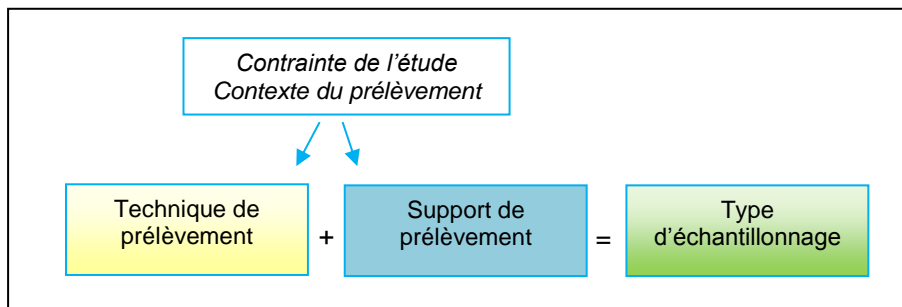


Figure 22 – Terminologie employée autour des prélèvements

Le tableau suivant présente des recommandations sur le choix des supports de prélèvement en fonction des contextes dans lesquels sont généralement réalisées les investigations de gaz du sol et d'air intérieur.

Tableau 7 – Recommandations sur le choix des supports de prélèvement en fonction des contextes

Contexte des prélèvements	Recommandations
1- Diagnostic préliminaire des gaz du sol Objectif : démontrer l'absence / présence de pollution (concentrations inconnues)	Gamme de concentration inconnue : privilégier des méthodes permettant d'obtenir une large gamme de concentrations Privilégier des supports adaptés à plusieurs composés
2- Diagnostic des gaz du sol en lien avec une évaluation des risques –Objectif : démontrer l'absence / présence de risque	Nécessité d'obtenir des LQ suffisamment basses : privilégier des supports adaptés / spécifiques aux composés recherchés
3- Prélèvements de gaz du sol de zones fortement contaminées Objectif : caractériser et dimensionner une source de pollution	Nécessité d'avoir un support capable de fixer des quantités importantes de composés volatils sans saturer
4- Prélèvements d'air intérieur / extérieur en lien avec une évaluation des risques Objectif : démontrer l'absence / présence de risque	Nécessité d'obtenir des LQ suffisamment basses : privilégier des supports adaptés / spécifiques aux composés recherchés

Le choix des supports de prélèvement les plus adaptés doit être basé sur des échanges avec le laboratoire.

Le tableau suivant présente la répartition des responsabilités entre le laboratoire et le préleveur pour l'analyse des gaz du sol et de l'air intérieur et extérieur.

Tableau 8 - Répartition des responsabilités entre le laboratoire et le préleveur pour l'analyse des gaz du sol et de l'air intérieur et extérieur

Tâche	Responsable
Discussions techniques sur les méthodes et supports	Laboratoire et Préleveur
Transport des supports avant et après prélèvement	Laboratoire
Prélèvement	Préleveur
Conditionnement	
Envoi des échantillons	
Réception des échantillons	Laboratoire
Analyse	
Envoi du rapport d'analyse	
Avis sur la représentativité et la fiabilité des résultats fournis	
Interprétation des résultats	Préleveur

6.4.2. Présentation des différents modes ou techniques de prélèvement

Le Tableau 9 présente un résumé des principes de fonctionnement de plusieurs dispositifs d'échantillonnage.

Des fiches descriptives, avec les avantages et les inconvénients de chacune de ces méthodes, sont présentées en Annexe 10.

Le détail de ces dispositifs d'échantillonnage est présenté dans la norme NF EN 14042 (Guide pour l'application et l'utilisation de procédures et de dispositifs permettant d'évaluer l'exposition aux agents chimiques et biologiques).

Divers groupes de travail ont été créés pour élaborer les exigences techniques et organisationnelles nécessaires à une homogénéisation des pratiques et à une amélioration des données issues des études concernant les sites et sols pollués.

En raison du manque d'inter-comparabilité des données d'analyses notamment pour les sols et les gaz des sols, un groupe de travail regroupant les laboratoires d'analyses et les bureaux d'études a été créé début 2013 sous l'égide du Ministère de l'environnement. Il est animé par le BRGM et rassemble 7 laboratoires d'analyse, des industriels, le MEDEF, l'UPDS, l'ADEME, l'INERIS, l'INRA, le Cofrac et le Ministère de l'environnement. Ce groupe aborde les aspects liés à la normalisation des méthodes d'analyse et à leurs exigences techniques, pour les sols, l'eau et les gaz des sols. Il a pour objectif d'harmoniser les pratiques des laboratoires d'analyses pour améliorer l'inter-comparabilité et la fiabilité des mesures des sols, gaz des sols et eaux.

L'annexe 11 présente les recommandations du groupe de travail concernant les supports de prélèvements et les méthodes d'analyse à appliquer pour les prélèvements actifs des principaux composés volatils. Les conclusions du GT laboratoires ainsi que des recommandations plus détaillées sur les paramètres de prélèvement seront mis en ligne sur le site du ministère de l'environnement.

Tableau 9 - Principes de fonctionnement des types d'échantillonnage des gaz du sol et de l'air intérieur / extérieur les plus couramment mis en oeuvre

Type d'échantillonnage		Principe de fonctionnement
échantillonnages actifs	Échantillonnage actif sur tubes à adsorption avec pompage	<p>Un volume déterminé d'air est aspiré par une pompe à travers un (ou plusieurs) tube(s) à adsorbant adapté(s) aux composés recherchés. Ces composés volatils sont adsorbés sur l'adsorbant puis les tubes sont fermés et envoyés au laboratoire pour analyse. Les composés piégés sur les tubes sont désorbés par désorption chimique (solvant) ou thermique (effet de température).</p> <p>Il existe également des tubes à désorption thermique dits « multicouches » contenant plusieurs adsorbants différents et spécifiques dans un unique tube, permettant ainsi d'adsorber une plus large gamme de composés.</p>
	Échantillonnage actif sur filtre imprégné avec pompage	<p>Un volume connu d'air est aspiré à l'aide d'une pompe, le flux de gaz traverse un filtre imprégné d'un réactif connu et choisi en fonction du composé recherché. Les composés présentant une affinité suffisante avec le réactif seront alors piégés sur le filtre.</p> <p>Le filtre est analysé afin de déterminer la masse de produit piégée.</p>
	Échantillonnage actif par barboteur	<p>Un volume connu d'air échantillonné est aspiré à travers un barboteur (petit container contenant une solution réactive) à l'aide d'une pompe. La solution est sélectionnée en fonction des composés ou du mélange de composés recherchés. Les solutions réactives appropriées sont choisies et les composés organiques volatils sont dissous dans la solution et retirés du flux d'air qui s'écoule.</p> <p>Le liquide sera alors analysé en laboratoire afin de déterminer la masse de composé retenu.</p>
	Échantillonnage actif par conteneurs en dépression (type « canister »)	<p>Des conteneurs métalliques à volume fixe en acier inoxydable sont préalablement nettoyés et mis en dépression au laboratoire.</p> <p>L'air est prélevé par la mise en place d'un détendeur sur le conteneur qui va capter l'air via la différence de pression entre le conteneur et l'air prélevé. L'ouverture du détendeur est réglée afin d'assurer un remplissage du conteneur selon la durée de prélèvement souhaitée.</p> <p>À la fin de l'échantillonnage, le conteneur est envoyé en laboratoire où l'air prélevé est analysé.</p>
	Échantillonnage actif en sac d'échantillonnage	<p>Les sacs d'échantillonnage sont composés d'un film polymère dont la nature, l'épaisseur et les propriétés physicochimiques varient. De nombreux films sont employés pour les sacs d'échantillonnage (PVF, FEP, PET, films d'aluminium...)</p> <p>L'échantillonnage de l'air à l'aide de sacs d'échantillonnage est réalisé avec l'utilisation d'une pompe pour envoyer un flux d'air dans le sac. Généralement, un volume mesuré d'un échantillon d'air est dirigé dans le sac durant une période de temps intégrée. Puisque les sacs sont des conteneurs flexibles, généralement fabriqués en film de Tedlar de 2 µm ou en film de Téflon de 2 µm et 5 µm, les débits d'air prélevé sont facilement maintenus tout au long du processus de prélèvement. Il est recommandé que le total des volumes de prélèvement ne dépasse pas 75-80 % de la capacité du sac afin d'éviter d'endommager les coutures du sac. Les sacs sont disponibles dans des tailles supérieures ou égales à 1 L.</p> <p>À la fin de l'échantillonnage, le sac est envoyé en laboratoire où l'air prélevé est analysé.</p>

Tableau 9 - Principes de fonctionnement des types d'échantillonnage des gaz du sol et de l'air intérieur / extérieur les plus couramment mis en œuvre (suite)

Type d'échantillonnage		Principe de fonctionnement
échantillonnages passifs		<p>Un type d'échantillonneur approprié (ex : SPG 0008[®] de AGI LLC (USA) / BeSureSampler[®] de Beacon Environmental Services (USA) / tube avec adsorbant de Beacon Environmental Services (USA) / corps diffusif avec adsorbant radiello[®]...) est sélectionné en fonction :</p> <ul style="list-style-type: none"> - du type de données que l'on souhaite acquérir (quantitatives ou qualitatives), - du type d'ouvrage et du milieu, - des substances ciblées, - du taux d'échantillonnage (si fourni) par diffusion du composé désiré à travers l'échantillonneur.
	Échantillonnage passif intégratif	<p>L'échantillonneur par diffusion est exposé aux gaz du sol ou à l'air intérieur (ou extérieur) pour une période de temps connue. Les gaz migrent dans l'échantillonneur par diffusion et sont adsorbés sur le support. Les échantillonneurs sont alors envoyés au laboratoire pour analyse. Les composés piégés sont désorbés soit par du solvant (désorption chimique) soit par de la chaleur (désorption thermique).</p> <p>Les résultats obtenus peuvent être qualitatifs (mesure de la masse de composé volatil piégé), semi-quantitatives, voire quantitatifs (concentrations des composés volatils) en fonction du type d'échantillonneur passif retenu et des informations fournies au laboratoire. Ainsi, notamment, outre la température et l'humidité (tant pour l'air intérieur que les gaz du sol), pour les gaz du sol les caractéristiques physiques du sol comme la porosité totale, la teneur en eau seront à fournir au laboratoire AGI LLC (USA).</p>

6.4.3. Durée de prélèvement

Les durées de prélèvement devront être adaptées :

- aux objectifs de l'étude définis dans le CPIS (Conception de Programmes d'Investigations ou de Surveillance - norme NF X 31-620-2) ;
- en cohérence avec les spécifications des dispositifs mis en œuvre (en particulier sur les limitations du débit de pompage) ;
- en cohérence avec les limites de quantification adéquates au regard des critères de comparaison retenus sur la base du schéma conceptuel (pour l'interprétation des concentrations observées).

Remarques

① - Lors de l'utilisation de supports adsorbants, en cas de suspicion de fortes concentrations pour les composés gazeux recherchés (par exemple suite à des mesures PID montrant des niveaux élevés de composés volatils) qui pourraient engendrer des risques de saturation des supports de prélèvement, il est recommandé :

- d'adapter la durée de prélèvement afin de limiter les risques de saturation et de migration de ces composés sur le support de prélèvement (*exemple pour des prélèvements réalisés en parallèle : si un des prélèvements était initialement prévu sur 4 h (car mis en parallèle d'autres supports nécessitant 4 h de pompage) et que la limite de quantification minimum souhaitée peut être atteinte en 1h, alors en cas d'indice niveaux élevés de composés volatils il est recommandé de limiter la durée de prélèvement de ce support à 1h*) ;
- de réaliser plusieurs prélèvements avec des volumes pompés différents par exemple en réalisant deux prélèvements avec des temps / débits de prélèvements différents (*par exemple s'il était initialement prévu un prélèvement de 4h à 0,5 L/min, il est possible de réaliser un autre prélèvement en parallèle d'1h à 0,2 L/min afin de limiter les risques de saturation de ce 2nd support en cas de saturation du 1^{er}*) ;

Note : si le volume de prélèvement doit être réduit par rapport au volume prévisionnel, il est recommandé de diminuer le débit plutôt que la durée de prélèvement, afin de faciliter la cinétique d'adsorption lors du prélèvement.

② - En cas de prélèvements actifs longs (≥ 4 h), il est recommandé de procéder à des contrôles visuels réguliers de l'installation et de ne pas laisser les pompes de prélèvement sans surveillance afin de pouvoir réagir rapidement en cas de problème (arrêt des pompes, détachement d'un flexible...).

③ - En cas de prélèvement de volumes importants (ex : 50 L, 100 L...), il conviendra de veiller à ce que le rayon d'influence de l'ouvrage de prélèvement ne soit pas susceptible d'entraîner des interférences en recoupant par exemple la surface du sol, ou le rayon d'influence d'un autre ouvrage de prélèvement.

6.4.4. Protocoles de prélèvement actif sur tube à désorption (thermique ou chimique), sur filtre imprégné ou sur barboteur

a) Préparation de la ligne de prélèvement

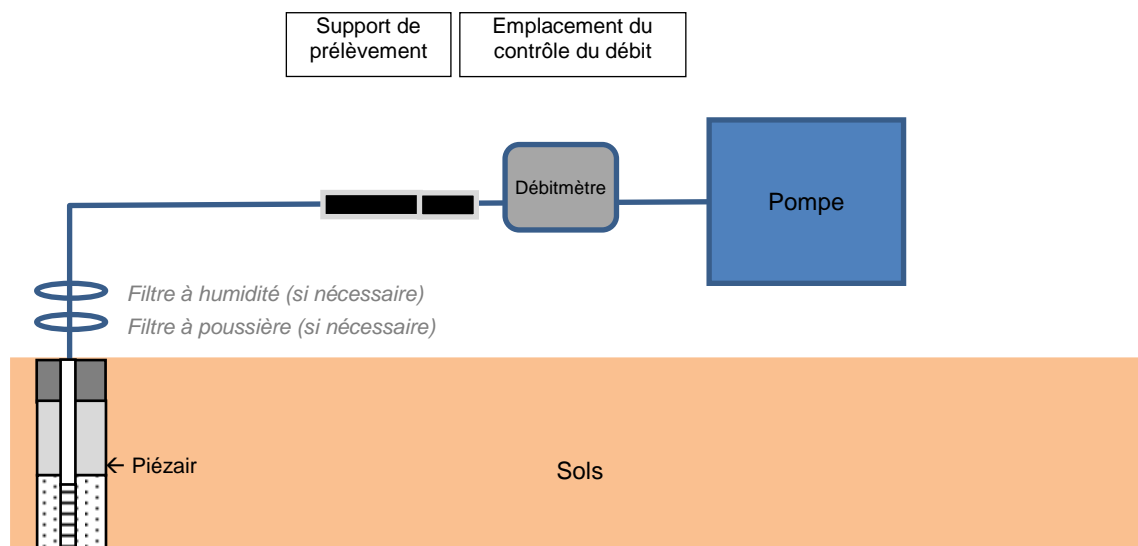


Figure 23 – Schéma de principe d'un prélèvement de gaz du sol (ligne simple avec 1 support de prélèvement)¹³

Préalablement à la réalisation du prélèvement, il conviendra de vérifier l'absence d'eau dans l'ouvrage. Suite à cela, la ligne de prélèvement pourra être mise en place.

Une ligne de prélèvement complète est composée successivement (depuis les gaz du sol (amont), jusque vers la pompe de prélèvement (aval)) de :

- flexibles,
- filtre à poussières (si nécessaire),
- filtre à humidité (si nécessaire),
- le cas échéant, dispositif de répartition des flux,
- supports de prélèvement,
- emplacement du contrôle du débit,
- pompe de prélèvement d'air et régulateur de débit.

La Figure 23 et la Figure 27 illustrent des lignes de prélèvement de gaz du sol avec 1 ou 2 supports de prélèvement.

Remarque : en fonction des conditions météorologiques (fortes chaleur / lumière, précipitations, neige...) des mesures peuvent être à prendre afin de protéger les supports de prélèvements (protection de la chaleur, du froid, de la lumière, de la pluie...) et améliorer la qualité du prélèvement.

¹³ Ce schéma illustre un prélèvement de gaz du sol. Dans le cas de prélèvements d'air intérieur / extérieur, la ligne de prélèvement est similaire à l'exception de la partie implantée dans les sols.

Les éléments constitutifs de ces lignes de prélèvements sont présentés ci-après.

- **flexibles** : raccords en matériau inerte de préférence en PTFE (téflon® ; polytétrafluoroéthylène). Ces capillaires à usage unique, pour la partie située entre le milieu prélevé et le support de prélèvement, peuvent également être en PEHD (polyéthylène haute densité) ou PP (polypropylène). L'utilisation de silicone ou de PVC est à éviter à cause du relargage / adsorption de certaines substances.

Remarques

① - La longueur des lignes de prélèvement doit être minimale entre la pompe et le point de prélèvement :

- inférieure à 1 m entre la tête de l'ouvrage de prélèvement et la pompe pour les gaz du sol,

- inférieure à 1 m entre le support de prélèvement et la pompe pour l'air intérieur / extérieur.

② - L'utilisation de scotch ou de matériaux similaires (émetteurs de COV) est à proscrire sur l'ouvrage et l'ensemble de la ligne de prélèvement.

- **filtre à poussières** : en fonction des observations de terrain, il doit être évalué la nécessité de mettre en place un filtre à particules en amont des supports de prélèvement. Le choix du filtre à particules s'effectuera en fonction des composés recherchés afin de ne pas interférer avec les analyses à réaliser.
- **filtre à humidité** : en fonction des mesures d'hygrométrie du milieu à prélever, il peut être envisagé d'installer un filtre à humidité en amont des supports de prélèvement afin de les protéger. **Peu de données sont disponibles sur l'affinité des composés volatils sur ce type de filtre, il conviendra de valider scientifiquement l'absence d'impact lié à leur utilisation** en réalisant par exemple des doublons (prélèvements simultanés en parallèle) avec un support protégé par un filtre à humidité et un support sans filtre à humidité. Une discussion préalable avec le laboratoire d'analyse peut également être réalisée afin qu'il puisse se rapprocher de ses fournisseurs ou du fabricant.

En lien avec les phénomènes présentés en 2.3.2, l'humidité présente dans l'air prélevé peut perturber les phénomènes d'adsorption de composés volatils sur des matrices adsorbantes notamment pour les plus hydrophiles (gel de silice par exemple). En cas de forte humidité relative des gaz du sol, il est recommandé d'utiliser des supports adsorbants hydrophobes ou de diminuer le volume de prélèvement afin de limiter le risque de saturation en eau de l'adsorbant.



Figure 24 – Exemples de supports de prélèvement saturés en eau (gel de silice imprégné DNPH en haut et charbon actif en bas)

Lors des prélèvements, un contrôle visuel peut permettre d'identifier une saturation en eau du support (cf. Figure 24) et invalider le prélèvement (il ne sert ainsi à rien d'envoyer au laboratoire un support saturé en eau et de réaliser l'analyse du support). Dans ces cas-là, il est préférable de renouveler le prélèvement en utilisant un filtre à humidité adapté aux composés recherchés et/ou en adaptant les paramètres de prélèvement afin de diminuer le volume prélevé (tout en atteignant les objectifs de concentration souhaités).

Selon les cas, la réalisation de nouveaux prélèvements de gaz du sol dans des conditions plus favorables doit être privilégiée.

L'utilisation de filtres à humidité en gel de silice est à proscrire et le choix du filtre à humidité doit s'effectuer en fonction des composés recherchés afin de ne pas interférer avec les analyses à réaliser.

Remarque

Lorsque les deux types de filtres (filtre à humidité et filtre à poussières) sont mis en place, le filtre à poussières est à placer en amont du filtre à humidité.

- **dispositifs de répartition des flux** (vanne, vis..), en matériau inerte : Lorsque cela est possible, il est préférable d'utiliser une pompe par support de prélèvement. Lorsque cela n'est pas possible et que des supports sont mis en parallèle (cartouches de natures différentes pour des mesures de familles de composés différents...) sur une même pompe, l'utilisation de dispositifs de répartition des flux est recommandée afin de contrôler, spécifiquement, les flux pour chacun des supports de prélèvement. Ce type de système étant réutilisable, il est recommandé de le placer de préférence en aval des supports de prélèvements, entre les supports et la pompe, afin de limiter les risques de contamination croisée.

L'utilisation de « T » simples est à proscrire en cas de mise en parallèle de plusieurs supports sur une même pompe.

Remarque

L'augmentation du nombre de filtres et supports de prélèvement mis en série et/ou en parallèle avec une même pompe peut entraîner des pertes de charges importantes qui seront dans certains cas supérieures aux pertes de charges acceptées par la pompe. Dans ces situations, la pompe se mettra en défaut, et une modification de la chaîne de prélèvement pourra être envisagée afin de limiter les pertes de charge sur la ligne de prélèvement.

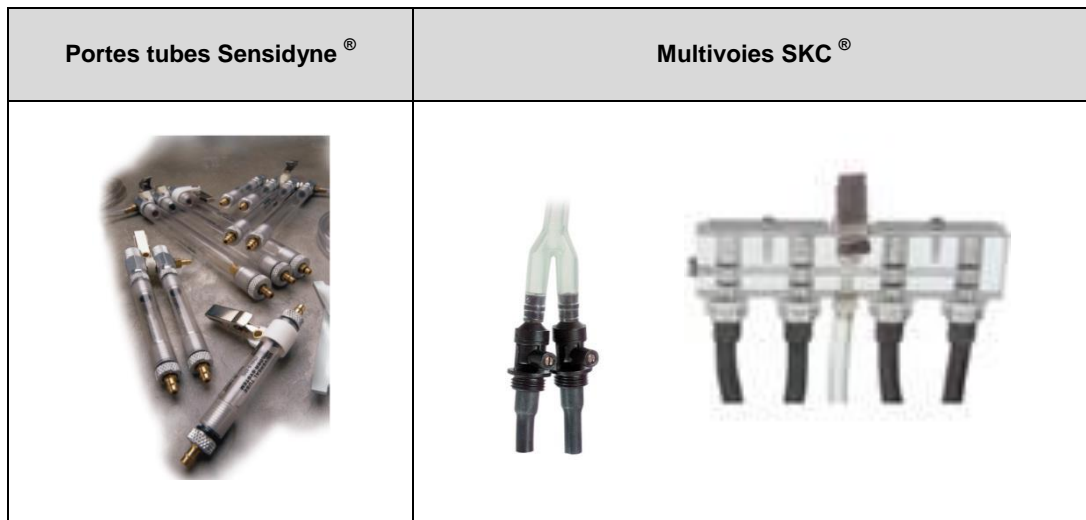


Figure 25 – Illustrations de systèmes de répartition des flux

- **supports de prélèvement spécifiques aux composés recherchés :**

Les supports adsorbants, filtres ou barboteurs sont placés en fin de ligne de prélèvement, en amont immédiat de la pompe. L'orientation des supports de prélèvement doit être vérifiée (une flèche représentant la direction du flux d'air est généralement indiquée sur les supports adsorbants) afin d'éviter une inversion de ceux-ci.

Remarque

La mise en place de plusieurs types de supports en série est à proscrire (à l'exception de supports identiques utilisés comme couche de mesure et couche de contrôle).
--

Les supports adsorbants peuvent comporter ou non une couche de contrôle.

- dans le cas où le support adsorbant inclut une couche de mesure et une couche de contrôle, une seule cartouche est installée et **l'analyse doit être impérativement réalisée sur chacune des deux couches.**
- dans le cas où la cartouche utilisée inclut uniquement une couche de mesure, il est recommandé de placer 2 tubes en série. Le second tube servant de contrôle en cas de saturation du premier (l'analyse portera alors sur chaque tube),

Remarque

Certains adsorbants peuvent engendrer de fortes pertes de charges qui ne permettraient pas leur mise en série. Dans ce cas, il est recommandé de :

- privilégier des supports alternatifs contenant une zone de contrôle ;
- limiter au minimum le volume de prélèvement ;
- réaliser des doublons avec des prélèvements en parallèle.

Remarque

Les supports et lignes de prélèvement doivent être de préférence à température ambiante lors du prélèvement afin d'éviter des effets de condensation dans les tubes notamment si les supports sont plus froids que l'air prélevé.

- **pompe de prélèvement d'air et régulateur de débit :** les pompes utilisées doivent être fabriquées selon les recommandations de la norme NF ISO 13137 (Air des lieux de travail - Pompes pour l'échantillonnage individuel des agents chimiques et biologiques - Exigences et méthodes d'essai) et doivent être adaptées au débit de prélèvement envisagé.

Remarque

A bas débits (0,01 à 0,75 L/min), la stabilité du flux d'air peut être difficile à garantir. Il est alors recommandé de mettre en place des régulateurs bas débits ou CPC (Constant Pressure Controller) qui sont constitués d'une valve située dans le régulateur et permettant à de l'air supplémentaire de

pénétrer maintenant ainsi la pression constante. Certaines pompes sont équipées en série de régulateurs bas débit (ex : Gilair plus,...). Certaines pompes nécessitent l'ajout d'un module spécifique sur la pompe (Gilair 3 et 5, Gilian,...). D'autres pompes ne possèdent pas de régulateur de pression, ni de modules spécifiques (AirChek, AirLite Pumps...). Pour ces pompes, il convient de placer un kit en amont immédiat de la pompe.



Figure 26 – Kit Constant Pressure Controller (CPC) – SKC®

- **débitmètre** : le débitmètre utilisé doit respecter les conditions techniques suivantes :
 - être adapté aux gammes de débits à mesurer,
 - être adapté aux conditions de température et humidité du milieu prélevé (humidité relative pouvant être supérieure à 90%).

Remarque

Certains débitmètres ont des gammes de fonctionnement limitées à des plages de température / humidité très restreintes.

- avoir une incertitude de mesure <5%,
- pouvoir être placé en série (entre le support de prélèvement et la pompe).

b) Réglage de la pompe et contrôle du débit

Un **contrôle régulier du débit sur site** est nécessaire pour permettre de détecter des dérives dans le temps, d'opérer un réglage optimal des débits et de calculer le volume d'air échantillonné sur la durée du prélèvement.

Une calibration des pompes avant et après la campagne (par exemple dans le cas de location de pompes qui sont calibrées à l'envoi et au retour) **n'est pas suffisante pour garantir la connaissance du débit lors des prélèvements** en raison des variations de débits qui seront engendrées par les pertes de charges propres à chaque prélèvement (perméabilité des sols, températures, conditions de transport des pompes...).

Lors des opérations de réglage et de contrôle des débits sur site, le débitmètre est à placer de préférence entre la pompe et le support de prélèvement, afin d'éviter une éventuelle contamination croisée liée au débitmètre. Lors de la mise en place du débitmètre, il est préférable d'arrêter le pompage afin qu'aucun flux d'air ne traverse les supports de prélèvement et que la pompe ne soit pas soumise à des changements brutaux de perte de charge.

Remarque

Si la ligne de prélèvement ne permet pas l'installation du débitmètre en aval du support, des supports dédiés à la calibration (identiques aux supports de prélèvement) peuvent être utilisés afin de procéder à la calibration en plaçant le débitmètre en amont des supports. Néanmoins, le retour d'expérience montre qu'il peut être constaté des variations de pertes de charge pour des supports identiques.

Le débit de prélèvement est à mesurer **au minimum au début et à la fin du prélèvement** (y compris pour les pompes auto-calibrantes et les pompes enregistrant les débits et durées de pompage) pour chacun des supports **sur les lignes complètes avec l'ensemble du matériel installé** (afin de prendre en compte l'ensemble des pertes de charge). Pour des prélèvements de durée supérieure à 4h, il est recommandé de réaliser des contrôles intermédiaires (début / milieu / fin du prélèvement).

Lorsque des supports sont placés en parallèle sur une même pompe, il convient d'utiliser un système de répartition des flux (comme indiqué précédemment, l'utilisation de « T » simples est à proscrire lorsque des supports sont placés en parallèle sur une même pompe) afin de pouvoir régler finement le débit transitant dans chaque branche. Le débit propre à chaque branche est mesuré, ainsi que le débit total, mesuré en amont immédiat de la pompe, comme indiqué sur la Figure 27.

En cas d'utilisation de plusieurs supports pour la caractérisation des gaz du sol, le débit total ne doit pas dépasser les 2 L/min au sein d'un même ouvrage pour éviter la formation de voies de transferts préférentielles dans les sols et la possibilité de prélever de l'air extérieur si le rayon d'influence atteint la surface et si la durée de prélèvement est importante.

Remarque

En cas de prélèvements réalisés sur un ouvrage avec plusieurs supports de prélèvement et un débit de pompage cumulé supérieur à 2 L/min, il est possible :

- de réaliser plusieurs ouvrages de prélèvements (cf. 3.2 pour leur implantation spatiale), ou
- de réaliser des prélèvements successivement en veillant à ne pas dépasser un débit total de 2 L/min au sein d'un même ouvrage.

Les débits à appliquer par support sont généralement inférieurs à 2 L/min. En cohérence avec les recommandations des différents référentiels, il convient d'appliquer les débits suivants :

- entre 0,2 et 0,5 L/min pour des prélèvements sur charbon actif (utilisés couramment pour COHV, HCT, BTEX),
- de l'ordre de 1 L/min pour les filtres imprégnés,
- inférieurs à 0,2 L/min pour les supports adsorbants à désorption thermique.

Remarque

La faible perméabilité de certains types de terrain peut entraîner des limitations des débits de prélèvement de gaz du sol (voire une mise en défaut des pompes). Dans cette situation, il est recommandé de diminuer le débit et d'allonger la durée de prélèvement et /ou de modifier la configuration ou le type de l'ouvrage de prélèvement (ex : remplacer une canne-gaz par un piézair afin d'augmenter la surface d'échange avec les gaz du sol).

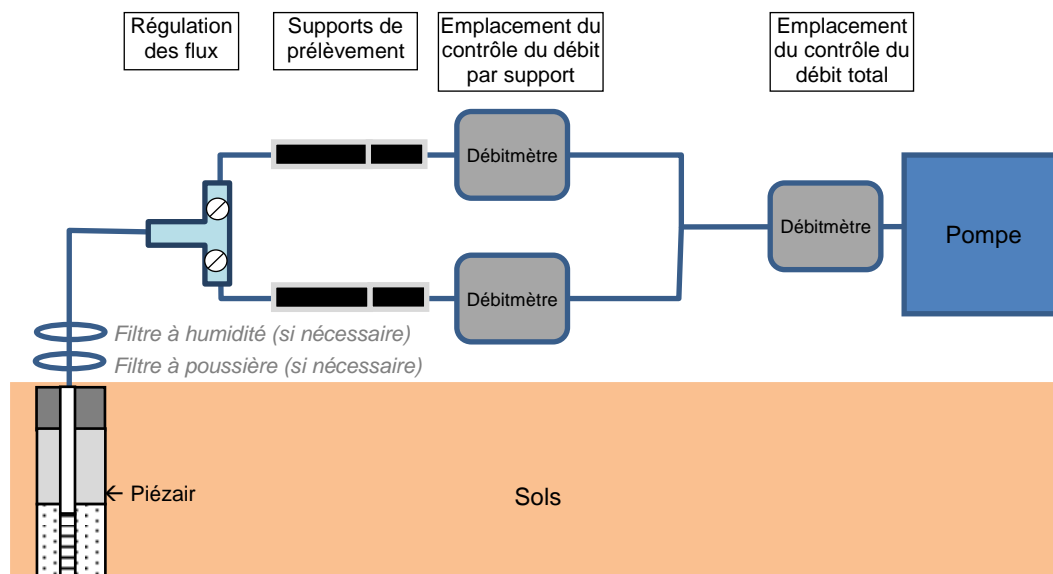


Figure 27 – Schéma de principe d'un prélèvement de gaz du sol pour deux supports en parallèle avec emplacement des contrôles de débits à réaliser

Remarque

Il est préférable de privilégier les lignes simples (cf. Figure 23) car la simplicité des lignes de prélèvement diminue les risques de perturbation des débits.

Représentativité des débits

Comme indiqué précédemment, les débits sont à mesurer pour chaque support au minimum en début et fin de prélèvement, sur la ligne de prélèvement complète afin d'intégrer l'ensemble des pertes de charges. Cette vérification est à réaliser sur site afin de pouvoir procéder à une nouvelle mesure en cas d'écart, voire de procéder à un réajustement des débits si nécessaire.

Si l'écart de débit mesuré pour un support est inférieur à 5%¹⁴ entre le début et la fin du prélèvement, le débit moyen est retenu pour le calcul du volume prélevé.

¹⁴ NF EN 1232 : Air des lieux de travail - Pompes pour l'échantillonnage individuel des agents chimiques

Si l'**écart de débit** mesuré pour un support **est compris entre 5%¹⁴ et 10%¹⁵** entre le début et la fin du prélèvement, le **débit minimum est retenu** pour le calcul du volume prélevé.

Si l'**écart de débit** mesuré pour un support est **supérieur à 10%¹⁵** entre le début et la fin du prélèvement, le **prélèvement n'est pas considéré comme représentatif**.

La somme des débits mesurés pour chaque support doit être comparée au débit total en début et en fin de prélèvement. En cas d'écart de plus de 10 %, la mesure n'est pas considérée comme représentative et il sera alors nécessaire de procéder à un nouveau prélèvement.

Un contrôle régulier du débit peut permettre de détecter ces dérives rapidement, et d'opérer un réglage optimal des débits.

Certains fabricants fournissent des pompes avec un compteur volumétrique intégré qui permet de connaître le volume d'air prélevé. En cas de ligne simple (avec 1 pompe par support), les volumes indiqués par la pompe peuvent permettre de confirmer les volumes prélevés calculés à partir des contrôles de débit.

Il existe aussi des pompes avec contrôle et re-calibration automatique des débits lors des prélèvements.

Remarque

En cas de sols très compacts et peu perméables, il peut s'avérer difficile de prélever le volume d'air envisagé, notamment en raison d'une mise en défaut des pompes qui peut se produire en cas de pertes de charges trop importantes. Dans ces cas, la représentativité des prélèvements de gaz du sol peut être altérée. Différentes solutions existent consistant à :

- changer le type ou la morphologie de l'ouvrage de prélèvement afin de créer une chambre de prélèvement ou une zone crépinée plus importante, et ainsi avoir une surface de contact plus importante avec les sols améliorant ainsi le passage de l'air ;
- modifier les techniques ou l'organisation des prélèvements (diminuer le débit de prélèvement et pomper sur une durée plus longue, diminuer le nombre de supports en parallèle...).

c) Identification, conditionnement et transport des échantillons

Lors de l'identification de tubes de prélèvements d'air, il est recommandé de ne pas utiliser d'étiquettes autocollantes (ou de colle) ni d'écrire directement au feutre sur les supports en verres de prélèvement d'air. Les traces de colle résiduelle sont susceptibles de contaminer les échantillons, notamment lors

¹⁵ Guide [Fluxobat, 2013]

d'analyses par désorption thermique. Le laboratoire fournissant les supports de prélèvement pourra cependant mettre à disposition des étiquettes autocollantes pour les supports à désorption chimique s'il est en mesure de fournir une étude démontrant l'absence de contamination vis-à-vis des composés analysés.

Pour pallier ces contraintes, il est donc fortement recommandé de :

- obturer correctement les supports afin d'éviter tout relargage et contamination à l'issue du prélèvement ;
- relever les références uniques présentes sur chaque support (existantes sur la majorité des supports) ;
- conditionner les supports de manière à les protéger de la lumière (dans un emballage de type feuille d'aluminium ou contenant opaque par exemple) ;
- rassembler les différents supports d'un même point de prélèvement dans un même contenant (ex : sachet plastique pouvant être fermé ; type zip par exemple) inerte chimiquement et correctement identifié (ex : sachet alimentaire) ;
- indiquer les références de chaque support en accompagnement du bon de commande des analyses.

Remarque

La dépose des échantillons directement dans la glacière doit être évitée. Ils doivent être préalablement conditionnés dans des contenants fermés inerte chimiquement.

L'ensemble des supports est conditionné dans un contenant (généralement une glacière fournie par le laboratoire munie de mousse ou contenant adapté aux supports d'analyses d'air) en prenant toutes les mesures nécessaires à la protection des supports lors du transport et en utilisant des matériaux neutres (non susceptibles de relarguer des composés volatils lors du transport).

Les échantillons doivent être stockés à la température recommandée par les normes et les laboratoires à l'abri de la lumière pour certains et envoyés au plus tôt au laboratoire à l'issue de l'intervention (dans tous les cas, dans les délais préconisés par les normes ou indiqués par les laboratoires).

Remarque

Les glacières servant au transport des échantillons servent à de multiples occasions et peuvent générer à elles-seules des émissions de composés volatils (exemple : casse de flacons, mauvaise obturation, relargage des matériaux,...). L'emploi d'un contenant fermé (inerte chimiquement) permettant de stocker tous les supports (blancs et échantillons) est une mesure de contrôle complémentaire susceptible de réduire davantage les risques de contamination croisée et de sécuriser la fiabilité des mesures et l'exploitation des résultats.

Les échantillons d'air doivent être conditionnés dans des contenants différents des prélèvements d'autres matrices (eau, sols, végétaux...) afin d'éviter une contamination lors du transport.

d) Blanc de terrain et blanc de transport

Afin d'évaluer d'éventuelles interférences lors du prélèvement ou du transport des échantillons, des blancs de terrain (également appelés blancs de site) et/ou des blancs de transport doivent être réalisés pour les mesures d'air (gaz du sol et air intérieur). Les blancs seront à analyser selon la même procédure que les supports exposés.

Protocole de réalisation de blancs de terrain :

- Ouvrir les tubes des blancs de terrain au moment de l'ouverture des premiers tubes de prélèvement,
- Les refermer pendant la phase de pompage,
- Les ré-ouvrir lors de la désinstallation des tubes de prélèvement,
- Aucun pompage ne sera réalisé sur ces blancs de terrain.

Il est ainsi essentiel que les blancs de terrain soient conditionnés dans les mêmes conditions que les supports servant à la mesure pour pouvoir conclure sur une éventuelle interférence des conditions de terrain sur les supports.

A minima un blanc de terrain est à réaliser pour chaque type de support utilisé et par jour de prélèvement.

Protocole de réalisation de blancs de transport :

- Ouvrir les tubes au moment du conditionnement des échantillons puis les refermer avec les bouchons et les déposer dans la glacière.
- Aucun pompage ne sera réalisé sur ces blancs de transports.

Il est ainsi essentiel que les blancs soient conditionnés dans les mêmes conditions que les supports utilisés sur le terrain pour pouvoir conclure sur une éventuelle interférence du contenant sur les supports (donc le tube du blanc de transport doit être bouché à chaque extrémité).

A minima un blanc de transport est à réaliser pour chaque type de support utilisé et pour chaque glacière.

6.4.5. Protocoles de prélèvement actif en sac d'échantillonnage

Le prélèvement de l'air à l'aide de sacs d'échantillonnage est réalisé avec l'utilisation d'une pompe pour envoyer un flux d'air dans le sac. L'utilisation d'une pompe avec exhaure contrôlé est donc nécessaire. Puisque les sacs sont des conteneurs flexibles, généralement fabriqués en film de Tedlar de 2 µm ou en film de Téflon de 2 µm et 5 µm, les débits d'air prélevé sont facilement maintenus tout au long du processus de prélèvement. Il est recommandé que le total des volumes de prélèvement ne dépasse pas 75-80 % de la capacité du sac afin d'éviter d'endommager les coutures du sac. Les sacs sont disponibles dans des tailles supérieures ou égales à 1 L.

À la fin de l'échantillonnage, le sac est fermé puis envoyé en laboratoire où l'air prélevé est analysé.

Remarque : les durées de conservation sont parfois très courtes d'après les méthodes de référence (ex : moins de 4h entre le prélèvement et l'analyse pour le benzène selon la méthode NIOSH 3700).

6.4.6. Protocoles de prélèvement actif par conteneurs en dépression (canister)

Les conteneurs en dépression (canister) sont des conteneurs métalliques en acier inoxydable dont les surfaces internes ont été traitées pour éviter l'adsorption des composés. Ces conteneurs en dépression, dont les capacités sont généralement de 1 à 15 litres, sont mis en dépression par le laboratoire d'analyses.

À leur réception et avant toute utilisation, la dépression doit être vérifiée sur le manomètre équipant le canister afin de s'assurer que les conteneurs en dépression n'ont pas subi de contamination.

Préalablement à leur mise en service ou à leur raccordement à l'ouvrage de prélèvement, les conteneurs en dépression sont équipés d'un détendeur (avec débit pré-réglé). Pour les gaz du sol, lorsque l'étanchéité de l'ouvrage de prélèvement est garantie, et que la purge a été réalisée, le canister est relié à l'ouvrage de prélèvement via un flexible inerte et la vanne du canister est ouverte permettant ainsi aux gaz du sol d'y pénétrer. C'est la différence de pression entre l'intérieur du canister et les milieux échantillonnés qui permet l'entrée d'air dans le conteneur.

Lors de la commande du canister, la durée de prélèvement souhaitée est à préciser au laboratoire afin qu'il puisse fournir un détendeur adapté à cette durée de prélèvement.

À la fin de l'échantillonnage, il est vérifié que le canister est complètement rempli (le manomètre est alors proche de zéro), la vanne du canister est refermée et le canister est renvoyé au laboratoire où l'air prélevé est analysé. Lorsque le

canister est rempli et fermé, il n'y a pas de risque de contamination (durant le transport par exemple).



Figure 28 – Illustration d'un conteneur sous dépression (canister 6 L (source : projet Citychlor))

Régulièrement pendant le prélèvement, et avant la fermeture de la vanne, la pression du canister doit être contrôlée via un manomètre (installé sur le détendeur par exemple) afin de vérifier que la pression à l'intérieur du canister est toujours en légère dépression, garantissant ainsi que le prélèvement est bien en cours.

6.4.7. Protocoles de prélèvement passif

a) Généralités

Un échantillonneur passif spécifique est à sélectionner au regard des composés recherchés, des objectifs de l'étude, des gammes de concentrations attendues, des durées d'exposition et des limites de quantification souhaitées.

Le principe d'échantillonnage des supports passifs permet des durées d'expositions plus longues (allant de plusieurs heures à plusieurs jours) et/ou des expositions à des concentrations plus élevées.

En fonction de la nature et de la composition de l'échantillonneur passif, celui-ci peut être :

- enfoui directement dans les sols¹⁶ (généralement à 0,5 - 1 m de profondeur) (gaz du sol),
- installé dans un piézair (gaz du sol),
- ou disposé dans une pièce (air intérieur / extérieur).

Les échantillonneurs passifs utilisent le « transfert naturel » (ou « libre flux et non contraint ») des substances, du milieu vers le support de prélèvement. Au contraire, les techniques de prélèvement « actif » / dynamique utilisent un transfert forcé des composés du milieu vers le système de prélèvement (avec l'utilisation d'une pompe, par exemple). Ainsi, l'échantillonneur intégratif est alors exposé aux gaz du sol ou à l'air intérieur / extérieur pour une période de temps mesurée. La (les) vapeur(s) de composés organiques migre(nt) dans l'échantillonneur par diffusion et est (sont) ainsi adsorbée(s).

Certains échantillonneurs passifs fournissent des résultats en concentrations, alors que d'autres fournissent uniquement des résultats qualitatifs (connaissance uniquement de la masse piégée) ne permettant pas de connaître les concentrations présentes dans les gaz du sol ou l'air intérieur. Ces échantillonneurs qualitatifs seront plutôt utilisés pour une étude de screening ou pour délimiter un panache gazeux lié à une source de pollution dans les sols ou dans les eaux souterraines, en étudiant les variations spatiales des masses de composés adsorbés. Cela permettra, par exemple, lors d'un diagnostic de mieux cibler et positionner d'autres investigations (par exemple, l'installation de piézairs).

¹⁶ Cela est notamment le cas pour les SPG 0008[®] de Amplified Geochemical Imaging LLC (USA) et le BeSure Sampler[®] de Beacon Environnemental Services Inc (USA).

Le tableau suivant présente les types d'utilisation et de résultats pouvant être obtenus pour différents supports de prélèvements.

Tableau 10 – Types d'usage et de résultats pouvant être obtenus pour les différents supports de prélèvements

Support de prélèvements	Milieux concernés		Types de résultats obtenus	
	Air intérieur / extérieur	Gaz du sol	Masses	Concentrations
Echantillonneur passif intégratif radial de type « Radiello [®] »	X		X	X
Echantillonneur passif intégratif axial	X	X	X	X
Module SPG 0008 [®] de AGI LLC	X	X	X	X
BeSureSampler [®] de BEACON Environmental Services Inc	X	X	X	
Badges GABIE [®]	Support non adapté à des prélèvements statiques (conçus pour des mesures en hygiène professionnelle impliquant que les personnes soient en mouvement)			

L'échantillonnage passif est utilisé en France pour le milieu air (air intérieur, air des lieux de travail) et reste encore peu répandu pour les gaz du sol et dans ce cas surtout pour des études de screening (résultats en masse).

Un échantillonneur passif est constitué schématiquement des principaux éléments suivants :

- **un adsorbant** dont les caractéristiques physico-chimiques sont adaptées aux objectifs des prélèvements envisagés (nature des molécules étudiées, gammes de concentrations, durées de prélèvement, ...),
- **un ou plusieurs éléments protégeant le support adsorbant** du milieu étudié mais permettant néanmoins la diffusion des gaz. Par exemple, une membrane poreuse hydrophobe, un tube en acier inoxydable ou un vial en verre muni ou non d'une tête de diffusion, un corps diffusif. Ainsi, grâce à l'utilisation de technologies innovantes (adsorbant hydrophobe, membrane protectrice hydrophobe, etc.), et contrairement aux techniques usuelles, l'influence de l'humidité sur le prélèvement passif peut être limitée voire négligeable. Etant donné les taux d'humidité élevés dans les gaz du sol, cette caractéristique doit être soulignée,
- **une tête de diffusion**, surmontant pour certains, le vial en verre ou le tube en acier, qui a comme premier effet d'éviter les « courants d'air » en entrée.

Sont classiquement distingués en termes de principe de fonctionnement, les échantillonneurs passifs intégratifs radiaux et les échantillonneurs passifs axiaux :

- **Echantillonneur passif intégratif radial** (cf. Figure 29) : les substances étudiées présentes dans le milieu échantillonné sont mises au contact du support adsorbant selon un plan perpendiculaire à son axe (axe radial). Le vecteur de transfert des molécules étudiées du milieu vers le support adsorbant est perpendiculaire à l'axe principal de l'échantillonneur passif.

- **Echantillonneur passif intégratif axial** (cf. Figure 29) : les substances ciblées et présentes dans le milieu échantillonné sont mises au contact du support adsorbant selon un plan parallèle à son axe. Le vecteur de transfert des molécules étudiées du milieu vers le support adsorbant et l'axe principal de l'échantillonneur passif possèdent la même direction.

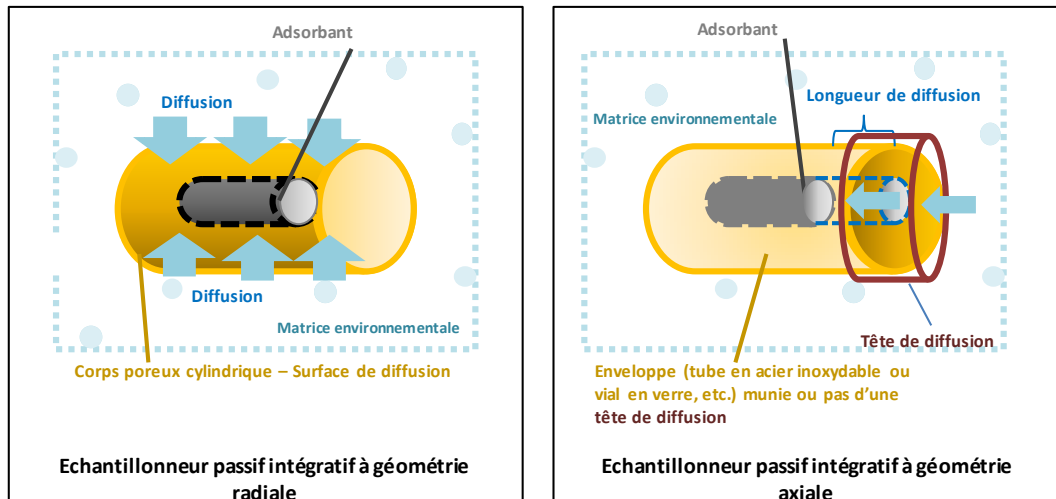


Figure 29 – Schéma de principe d'échantillonneur passif radial et axial (source : ADEME 2016)

D'une manière générale, la surface de diffusion (de la membrane, du corps diffusif, de la tête de diffusion, selon l'échantillonneur passif considéré), est plus grande pour un échantillonneur passif à géométrie radiale que pour un échantillonneur passif à géométrie axiale.

Remarque

Deux projets de recherche (PassSolair (réalisation INERIS avec un cofinancement ADEME-Ministère de l'environnement) et Tempair (réalisation BURGEAP-INERIS avec un cofinancement ADEME-BURGEAP-Ministère de l'environnement) concernent la mise en œuvre de supports passifs dans les milieux air intérieur / extérieur et gaz du sol.

Dans les sections suivantes, sont plus particulièrement décrits les supports et protocoles les plus couramment utilisés actuellement, pour les autres, le lecteur se reportera aux rapports des projets de recherche précités, qui présentent plus en détail les différents supports passifs et les résultats obtenus sur des sites pilotes (à paraître fin 2016).

b) Supports de prélèvements passifs pour l'air intérieur / extérieur

Des supports de prélèvements passifs ont été développés spécifiquement pour le milieu air intérieur en tenant compte des substances, des durées de prélèvements et des niveaux de concentration classiquement rencontrés (cf. Annexe 10).

➔ Echantillonneurs passifs intégratifs radiaux

Description

Les corps diffusifs avec adsorbant Radiello® (diffusion radiale) sont très utilisés dans les domaines de la qualité de l'air intérieur. Ils sont composés d'un support adsorbant « Radiello® » et d'un corps diffusif. Le support adsorbant est placé dans un tube réalisé en grille acier (maille 3x8 µm), de 4,8 mm de diamètre et de 60 mm de longueur, maintenu à chaque extrémité par des grilles en acier inoxydable puis introduit dans un corps diffusif cylindrique poreux en polyéthylène. L'ensemble est vissé sur une plaque de support, pour une exposition radiale. L'adsorption se fait sur toute la surface du cylindre et non, seulement à son extrémité.

La caractéristique principale du tube à diffusion est sa vitesse de diffusion (ou débit de prélèvement), qui varie selon :

- la nature du composé et de l'adsorbant,
- la concentration et le temps d'échantillonnage,
- la température ambiante lors du prélèvement.

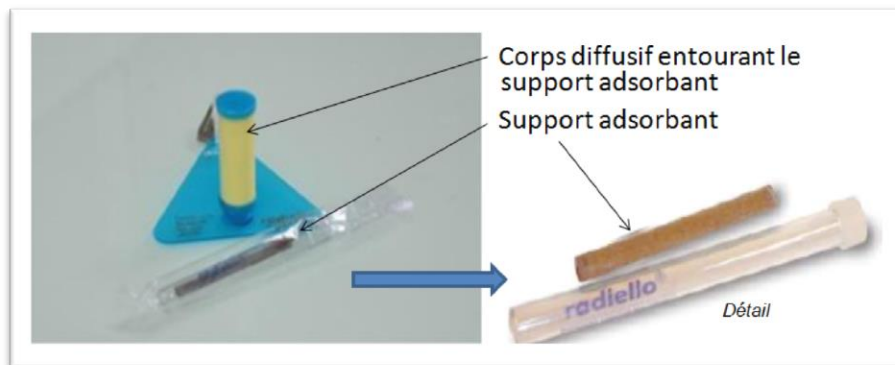


Figure 30 – Support "Radiello®" et son corps diffusif à diffusion radiale
(source : d'après Sigma-Aldrich)

Remarque

Les dispositifs GABIE® ont été conçus pour des mesures en hygiène professionnelle impliquant que les personnes soient en mouvement. En effet, le badge a besoin d'un minimum de mouvement d'air pour que la diffusion soit assurée. Une validation des vitesses d'air a été effectuée pour des vitesses d'air comprises entre 0,2 et 0,6 m/s (en comparaison / air intérieur : 0,05 à 0,1 m/s). Ils ne sont pas adaptés pour être laissés en place de façon statique comme cela est le cas, à l'heure actuelle, dans les études des sites et sols pollués. De plus, les limites de quantification atteignables par ces supports ne correspondent pas aux attentes notamment en termes de modalités d'interprétation (valeurs de gestion, VTR).

Protocole

La cartouche d'adsorbant préalablement conditionnée doit être conservée dans un tube en verre hermétiquement fermé par un bouchon en plastique. La durée de conservation de la cartouche est au maximum de 90 jours.

L'ensemble du dispositif peut être fourni sous forme de kit, ou le corps diffusif, le support et la cartouche séparément. Il est recommandé de transporter les échantillonneurs passifs démontés jusqu'au site faisant l'objet de prélèvement. Les cartouches adsorbantes sont ainsi transportées, conditionnées dans leur tube en verre. Les membranes poreuses et les plaques de supports à visser sont transportées de préférence individuellement ou en petite quantité (moins de 10 pièces) dans des sachets hermétiques pour éviter la contamination par l'air ambiant.

Avant le prélèvement, la cartouche est replacée dans le corps diffusif fixé à son socle. Il est recommandé de ne pas toucher les cartouches avec les mains lors de l'insertion de la cartouche adsorbante dans la membrane poreuse. Pour ce faire, le tube en verre est ouvert et la cartouche glissée directement dans la membrane.

Après l'exposition (durée des prélèvements présentée en 4.4.2), la cartouche d'adsorbant est replacée dans son tube en verre fermé hermétiquement. Les cartouches Radiello® peuvent être conservées au choix et selon les pratiques en vigueur, 28 jours après l'exposition à température ambiante ou au maximum 90 jours après exposition au réfrigérateur [LCSQA-INNERIS, 2014].

Ce type de tube est également bien adapté à des concentrations faibles (inférieures à $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$), pour lesquelles les tubes axiaux présentent une incertitude de mesure importante [INNERIS, 2004].

L'influence des paramètres environnementaux cités ci-après est considérée comme négligeable sur les prélèvements pour les gammes suivantes :

- une humidité relative comprise entre 15 et 90%,
- une vitesse de l'air comprise entre 0,1 et 10 m/s.

En laboratoire, les composés peuvent être désorbés thermiquement ou chimiquement. Les résultats sont transmis par le laboratoire en masse ainsi que sous la forme de concentration, au regard des conditions d'exposition (humidité, température) et des caractéristiques de la tête de diffusion, et des durées de prélèvement.

Tout comme pour les prélèvements sur des échantillonneurs actifs, des blancs de terrain et de transport doivent être réalisés.

Au regard de ses dimensions, ce système radial ne peut être inséré dans un piézair en raison du faible diamètre interne de l'ouvrage. Le Radiello® radial avec corps diffusif ne peut donc être mis en œuvre dans le cas de prélèvement des gaz du sol.

Remarque

Il peut être nécessaire de réaliser un échantillonnage complémentaire actif dans certains cas. Par exemple, dans le cadre de l'échantillonnage passif des COHV, il sera nécessaire de réaliser un échantillonnage actif en parallèle pour le chlorure de vinyle qui ne s'adsorbe pas sur les supports passifs.

➔ **Echantillonneurs passifs intégratifs axiaux**

Description

Différents tubes sont disponibles comportant différents adsorbants (carboxen¹⁷ et le Tenax TA conviennent parfaitement, tout comme les cartouches à lits multiples (CT300 (carbotrap B, carbotrap C, carbosieve III), carbopack C, carbopack B, carbopack X, carbosieve SIII, carbotrap B et carbograph 4 et 5...). Par exemple, les tubes de diffusion axiale commercialisés par la société BEACON Environmentals Services peuvent comporter différents adsorbants (chromosorb[®], spherocarb[®], carbotrap[®]...) conditionnés dans des tubes en acier inoxydable.

Le débit de diffusion ou le taux d'échantillonnage est contrôlé grâce à une tête de diffusion placée à l'une des extrémités du support. La société BEACON Environmentals Services propose des tubes avec une tête de diffusion seulement depuis 2015.

Remarque

L'INERIS conditionne des tubes à diffusion axiale pour son usage interne avec un adsorbant de type Radiello[®] inséré dans un tube en acier inoxydable (Figure 31), et analysé à l'INERIS¹⁸.

¹⁷ Carboxen 563, Carboxen 164, Carboxen 569, Carboxen 1000...

¹⁸ L'INERIS ayant réalisé différentes études de validation dont par exemple : Gonzalez-Flesca, N. and A. Frezier, *A new laboratory test chamber for the determination of diffusive sampler uptake rates*. Atmospheric Environment, 2005. 39: p. 4049-4056



Figure 31 – Tube passif conditionné par l'INERIS (tube acier inox et adsorbant Radiello® 145) (source : INERIS)

Protocole

Lors du prélèvement, l'une des extrémités est démunie de son bouchon Swagelock®. Le tube est alors « suspendu », l'extrémité ouverte orientée vers le bas. La tête de diffusion est fixée sur la tête du tube pendant l'exposition. Les composés organiques volatils sont alors piégés par adsorption pendant toute la durée de l'exposition (prélèvement diffusif).

En fin de période de prélèvement, la tête de diffusion sera retirée, et le bouchon Swagelock® remis en place.

➔ Module SPG 0008® de Amplified Geochemical Imaging LLC

Description



Figure 32 – Module SPG 0008® Amplified Geochemical Imaging LLC (source : INERIS)

Le SPG-0008® de Amplified Geochemical Imaging LLC est composé d'une membrane tubulaire poreuse GoreTex® hydrophobe et chimiquement inerte, contenant quatre cartouches d'adsorbant disposées dans toute la longueur du dispositif. Deux adsorbants de nature différente sont présents, afin d'élargir les gammes de composés échantillonnés. Ceux-ci sont adaptés en fonction de la nature des composés ciblés. Cependant, leurs compositions et caractéristiques ne sont pas divulguées puisque brevetées. La membrane GoreTex®, poreuse et

hydrophobe, permet l'utilisation de l'échantillonneur passif dans des milieux humides (gaz du sol notamment) tout en préservant l'intégrité des adsorbants. L'entreprise Amplified Geochemical Imaging LLC indique, au regard des caractéristiques des adsorbants développés, la possibilité d'échantillonner une très large gamme de substances allant des composés semi-volatils aux composés halogénés volatils.

Un autre dispositif, le TIPS[®] est en cours de développement, notamment afin de permettre la caractérisation de gammes de concentrations plus élevées. Il est également composé d'une membrane tubulaire poreuse GoreTex[®] hydrophobe et chimiquement inerte, contenant quatre cartouches d'adsorbant, mais ces dernières sont disposées côte à côte, dans un vial en verre muni d'un bouchon.

Protocole

L'échantillonneur passif doit être conservé dans son flacon de transport jusqu'à sa mise en œuvre sur site.

L'échantillonneur passif SPG-0008[®] ou TIPS[®] est simplement sorti de son vial et suspendu dans l'air à une hauteur appropriée, selon les objectifs de l'étude. Lors de son retrait, celui-ci doit être préalablement essuyé avec du papier essuie-tout propre avant d'être remis dans le flacon de transport, fermé hermétiquement pour l'envoi à la société Amplified Geochemical Imaging LLC pour l'analyse.

Un échantillonneur passif servant de blanc de transport est également à réaliser.

Les conditions de prélèvement (température, humidité et durée de prélèvement) sont à fournir à Amplified Geochemical Imaging LLC.

À la suite du prélèvement, l'échantillonneur passif est renvoyé aux Etats-Unis au distributeur pour une analyse réalisée par l'entreprise Amplified Geochemical Imaging LLC, *via* la méthode 8260C modifiée de l'US EPA (thermodésorption, GC-MS). Selon l'objectif de l'étude, plusieurs méthodes analytiques sont proposées par l'entreprise. Le choix de la méthode analytique est fonction des besoins de l'étude et des informations disponibles/renseignées dans le cadre des investigations.

Les résultats seront fournis soit en masse soit en concentration.

➔ **BeSureSampler® de BEACON Environmental Services Inc**

Description

Le BeSureSampler® (Figure 33) développé par l'entreprise américaine BEACON Environmental Services est composé d'un vial en verre muni d'un capuchon grillagé lors de la phase d'exposition, contenant deux cartouches de deux adsorbants.



Figure 33 – BeSure® Sampler de BEACON Environmental Services Inc (source : INERIS)

La composition de ces adsorbants n'est pas divulguée par l'entreprise puisque brevetée. Cependant l'entreprise BEACON Environmental Services Inc. indique que l'un est un adsorbant développé pour l'échantillonnage des composés très volatils (chlorure de vinyle, DCE...) alors que l'autre est développé pour les composés volatils (PCE, TCE...). Par ailleurs, l'entreprise BEACON Environmental Services, Inc. indique également que ces adsorbants sont hydrophobes et peuvent donc être utilisés pour des prélèvements en milieu humide.

L'entreprise BEACON Environmental Services Inc. indique, au regard des caractéristiques des deux adsorbants développés, qu'il est possible d'échantillonner une très large gamme de substances allant des composés semi-volatils aux composés volatils.

Protocole

Lors d'un prélèvement, le bouchon de voyage est remplacé par une tête de diffusion fournie par l'entreprise afin de permettre la diffusion et l'advection à l'intérieur de l'échantillonneur passif des gaz présents sur la zone investiguée. Les composés s'adsorbent alors sur les différents cartouches. Lors du retrait de l'échantillonneur passif, la tête de diffusion est retirée et remplacée par le bouchon de transport.

Un échantillonneur passif servant de blanc de transport est également à réaliser.

À la suite du prélèvement, l'échantillonneur passif est renvoyé aux États-Unis au distributeur pour une analyse par thermodesorption/GC-MS selon la méthode de l'US EPA 8260C modifiée.

Les résultats seront uniquement fournis en masse.

c) Supports de prélèvements passifs pour les gaz du sol

Pour les gaz du sol, des échantillonneurs ont été développés (ou sont en cours de développement), afin de tenir compte des spécificités de ce milieu (taux d'humidité important, concentration plus élevée...). Ces échantillonneurs sont commercialisés par des fabricants américains qui assurent leur fourniture et leur analyse (cf. Annexe 10).

La détermination des durées d'exposition des supports passifs sera réalisée en concertation avec le laboratoire et en considérant les composés recherchés, les gammes de concentrations attendues, la nature et les conditions des sols, les conditions météorologiques attendues, etc.

Il s'agit des deux dispositifs décrits précédemment :

- le Module SPG-0008[®] de Amplified Geochemical Imaging LLC et
- le BeSure[®] Sampler de BEACON Environmental Services Inc.

Ces dispositifs peuvent être utilisés dans des piézaires, dans des ouvrages temporaires ou mis en place directement dans les sols (cf. Tableau 3).

Le SPG-0008[®] fournira les résultats en masse ou en concentrations.

Les données fournies sont des données qualitatives (masses) ou quantitatives (concentrations). Les résultats quantitatifs sont déterminés en tenant compte de la spécificité des éléments d'informations fournis par l'opérateur (lithologie du sol, certaines caractéristiques physiques du sol comme la porosité totale ou la porosité à l'air, humidité, température, conditions météorologiques, etc.)¹⁹. Plus particulièrement, les résultats quantitatifs sont calculés par Amplified Geochemical Imaging LLC avec un facteur « d'influence » (*Soil effectiveness Factor*) faisant intervenir le coefficient de diffusion effectif du sol (relations proposées par Millington (1959) et Millington & Quirk (1961)), le coefficient de diffusion de la substance, et des paramètres environnementaux. Ces derniers sont la porosité totale du sol, la porosité à l'eau du sol, dont les valeurs sont issues de diagnostics du site ou prises par défaut, sur la base de la description lithologique (cf. valeurs issues de Johnson & Ettinger modeling equation inputs, US EPA, 2003). Dans ce dernier cas, il est recommandé de tenir compte uniquement des données qualitatives ou d'intégrer les incertitudes liées à ces choix aux résultats quantitatifs.

Le BeSure[®] Sampler de BEACON Environmental Services Inc. fournit des résultats uniquement en masse qui restent donc qualitatifs. Selon cette entreprise, les modèles mathématiques utilisés pour la conversion des masses en concentrations à partir notamment du taux d'échantillonnage, et autres paramètres ne sont pas assez précis. Des documents d'information et de retour d'expérience sont disponibles sur le site internet de l'entreprise BEACON Environmental Services Inc (<http://www.beacon-usa.com/>).

¹⁹ ou à défaut, uniquement la lithologie conduisant au choix de paramètres standards associés

6.5. PRÉCAUTIONS SPÉCIFIQUES DANS LE CAS DE PRÉLÈVEMENTS DE GAZ SOUS UN BÂTIMENT

Dans le cas de prélèvements de gaz du sol ou d'air sous dalle réalisées dans un bâtiment en parallèle de prélèvements d'air intérieur et dans une même pièce, les précautions suivantes doivent être prises afin d'éviter toute contamination de l'air intérieur :

- Réaliser les prélèvements d'air intérieur de préférence avant la réalisation des prélèvements des gaz du sol afin de limiter les risques de perturbation liés aux prélèvements de gaz du sol ou à la création de l'ouvrage.
- En cas de forage de la dalle, aspirer les poussières et/ou attendre que les poussières mises en suspension lors du perçage soient retombées.
- Ne pas évacuer l'air de la purge directement dans la pièce pendant ou avant le prélèvement d'air intérieur.
- Fermer hermétiquement l'ouvrage de prélèvement du piézair, du prélèvement d'air sous dalle ou de la canne-gaz en dehors des phases de prélèvement pour éviter le dégazage de composés volatils vers l'air intérieur.

En cas de prélèvement des gaz du sol sous un bâtiment, les précautions adéquates doivent être prises pour éviter l'émission de composés volatils dans l'air intérieur du bâtiment (maintenir l'ouvrage fermé en dehors des phases de prélèvement, filtration ou expulsion à l'extérieur du bâtiment de l'air extrait lors de la purge de l'ouvrage, réaliser un colmatage hermétique et pérenne du revêtement et/ou de la dalle béton lorsque l'ouvrage de prélèvement est retiré...). Ces précautions sont particulièrement importantes en cas de prélèvement concomitant d'air intérieur, et en cas de population pouvant être exposée aux composés volatils.

7. Analyse et interprétation des résultats

7.1. RAPPORT D'ÉCHANTILLONNAGE ET FICHE DE PRÉLÈVEMENT

Le rapport final d'échantillonnage devra contenir *a minima* les informations suivantes afin d'assurer la traçabilité de la prestation :

- un plan de situation de chaque prélèvement (y compris ceux réalisés à l'extérieur des bâtiments), avec des photographies de chacun d'entre eux (*a minima* champ/contre-champ en veillant au respect de la vie privée cf. remarque plus bas) ;
- une justification de la stratégie d'échantillonnage définie avec notamment le choix des emplacements des mesures par rapport à la contamination du sol ou de la nappe, par rapport aux mesures de gaz du sol ;
- une justification des supports de prélèvements retenus, des LQ choisies, ainsi que paramètres de prélèvement (débit et durée) ;
- pour l'air intérieur : les fiches « enquête » de la visite (exemple disponible en Annexe 4). Si des éléments collectés via ce questionnaire permettent d'expliquer les concentrations mesurées, ceux-ci devront être mentionnés dans le corps du rapport. Si des questionnaires n'ont pas pu être renseignés, cela doit être également mentionné et justifié ;
- les fiches de prélèvement : des exemples de fiche de prélèvement à renseigner au cours et à l'issue des prélèvements de gaz du sol et/ou d'air intérieur sont fournies respectivement en Annexe 5 et Annexe 6. Ces fiches de prélèvement doivent intégrer *a minima* les informations suivantes :
 - localisation du point de prélèvement ;
 - photos du point de prélèvement, de son environnement et du montage en lui-même ;
 - date et heure de l'échantillonnage ;
 - nom du préleveur ;
 - description précise de l'ouvrage de prélèvement (pour les gaz du sol) ;
 - profondeur ou hauteur d'échantillonnage :
 - pour les gaz du sol : la profondeur du toit et de la base de la zone crépinée ; dans le cas d'un prélèvement passif, profondeur du support ;
 - pour l'air intérieur : la hauteur d'échantillonnage ;
 - débit de pompage *a minima* en début et en fin de prélèvement ;
 - type de matériel et techniques utilisées ;
 - état du sol et de l'environnement (sol saturé en eau, fissurations, végétation présentant des signes de stress hydrique, ...) ;

- état du bâtiment (le cas échéant) ;
- détail et résultats des tests d'étanchéité (pour les gaz du sol) et de calibrations réalisés sur site ;
- gammes de concentrations attendues ;
- résultats de l'ensemble des mesures réalisées sur site (PID, analyseur multigaz, température ambiante, pression atmosphérique, humidité de l'air ambiant, humidité de l'air prélevé ...) ;
- recensement des activités ou phénomènes en cours pouvant influencer les concentrations ;
- la description de la procédure d'échantillonnage en précisant les références normatives lorsqu'elles existent, ou autres documents de référence ;
- les résultats des prélèvements (échantillons et blancs). Les bulletins analytiques doivent être fournis en annexe du rapport ;
- les observations ayant pu influencer les prélèvements ou les analyses ultérieures ainsi que, le cas échéant, l'analyse des dysfonctionnements détectés. Tout élément conduisant à l'invalidation d'un résultat (problème lors du prélèvement, lors de l'analyse, problèmes sur les blancs analytiques ou de terrain, résultats des couches de contrôle...) devra être précisé dans le rapport. Les données météorologiques doivent être fournies (précipitations durant les prélèvements et durant les 3 jours précédents, pression atmosphérique durant les prélèvements et durant les 3 jours précédents, température ambiante (durant les prélèvements et durant les 3 jours précédents), vitesse et direction du vent, température et humidité de l'air prélevé ;
- autres éléments utiles à la traçabilité de la prestation :
 - Conditions de conservation et de transport des échantillons (température, protection de la lumière, durée de transport de l'envoi des échantillons au laboratoire) ;
 - Délai entre la fin du prélèvement et l'analyse (jours) ;
 - Si pertinent, date de conditionnement et / ou de péremption des tubes (jj/mm/aaaa) ;
 - Dates d'analyse des échantillons et des blancs, témoins (jj/mm/aaaa).
- Toute modification de la stratégie d'échantillonnage sera précisée et justifiée.

Remarque

Dans le cas de campagnes de prélèvements dans un groupe d'habitations possédant plusieurs propriétaires, une attention sera portée au processus de mise à disposition des résultats et en particulier à la non divulgation d'information privée (état civil, adresse...). En effet l'article 6 de la loi du 17 juillet 1978 prévoit que seuls les intéressés ont le droit d'accéder aux documents « dont la

communication porterait atteinte à la protection de la vie privée ». Une restitution individuelle devra être effectuée et en cas de rapport global, une anonymisation des résultats sera réalisée. En outre, il est possible de demander au laboratoire (avant la prestation) qu'il remette des bordereaux par habitation pour faciliter la transmission des seuls résultats les concernant aux occupants.

7.2. RÉFÉRENTIELS D'INTERPRÉTATION

7.2.1. Gaz du sol

Actuellement aucune valeur de gestion ou référentiel d'interprétation n'existe pour le milieu gaz du sol.

La méthodologie nationale dans le domaine des sites et sols pollués mise en place en 2007 recommande la comparaison à l'environnement local témoin. L'interprétation des concentrations dans les gaz du sol peut donc être réalisée à l'aide de points situés à l'extérieur de la zone de pollution (suspectée ou connue).

Remarque : Une consultation est en cours sur la mise à jour de la méthodologie de gestion des sols pollués en France. Il est dans cette consultation de comparer les concentrations dans l'air (air intérieur ou gaz du sol) aux VTR comme cela est déjà pratiqué dans « la démarche de diagnostics des sols dans les lieux accueillant les enfants et les adolescents ».

7.2.2. Air intérieur

Ce document ne traite pas de l'étape d'analyse des échantillons décrite dans les normes *ad hoc*, ni de l'interprétation des résultats, celle-ci étant spécifique à chaque site.

Toutefois, l'air respiré au même titre que l'eau et les aliments est un milieu pour lequel des valeurs de références existent pour certaines substances.

Positionnement par rapport aux valeurs réglementaires

Aussi, la loi du 1^{er} août 2008 relative à la responsabilité environnementale prévoit de définir des « Valeurs-guides pour l'Air Intérieur ». Au jour de l'élaboration du présent document, le benzène et le formaldéhyde disposent de valeurs guides réglementaires, présentées dans le décret 2011-1727 du 2 décembre 2011. Ces valeurs réglementaires tiennent compte de plusieurs critères (économique, métrologique, sanitaire, etc.).

Par ailleurs, l'ANSES a mis en place depuis 2007 un groupe de travail pour l'élaboration des Valeurs Guides de la qualité de l'Air Intérieur (VGAI) pour la population générale, fondées exclusivement sur des critères sanitaires²⁰. Les composés disposant à ce jour de VGAI comprennent le formaldéhyde et le monoxyde de carbone (publiées en 2007) ainsi que le benzène (2008), le trichloroéthylène (2009), le naphthalène (2009), le tétrachloroéthylène (2010), les particules PM2.5 et PM10 (2010), l'acide cyanhydrique (2011), le dioxyde d'azote (2013), l'acroléine (2013) et l'acétaldéhyde (2014). À l'exception des VGAI du

²⁰ à l'exclusion des critères de faisabilité économique et de toute considération métrologique

benzène et du formaldéhyde, reprises dans le décret susmentionné, ces VGAI n'ont actuellement pas de statut réglementaire. Ces VGAI sont des « *cibles sanitaires à atteindre à long terme pour protéger la santé des personnes* ». [ANSES, 2011] présente l'actualisation et l'évolution de la méthode d'élaboration des VGAI pour les substances dont l'inhalation est la voie d'exposition majoritaire.

D'autres expertises sur des substances prioritaires établies sur la base de la nouvelle hiérarchisation des composés d'intérêt dans les environnements intérieurs [OQAI, 2010] devraient être disponibles prochainement ; c'est notamment le cas du 1,4-dichlorobenzène, du chloroforme, du fluorène et de l'éthylbenzène.

En complément de l'expertise de l'ANSES et dans une optique d'aide à la gestion, le HCSP a publié à la demande de la Direction Générale de la Santé des valeurs repères dites « de gestion » dans l'air des espaces clos ouverts au public²¹ prenant en compte ces critères sanitaires tout en les mettant en perspective avec les concentrations techniquement atteignables actuellement. Le HCSP a publié des recommandations pour le formaldéhyde (2009), le benzène (2010), le tétrachloroéthylène (2010), le naphtalène (2012) et le trichloroéthylène (2012) (cf. tableau en Annexe 12).

A défaut de VGAI disponible pour la substance quantifiée et afin d'être en cohérence avec leur processus d'élaboration, les Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR) pertinentes pour la voie d'exposition par inhalation pour les effets à seuil et sans seuil seront prises en compte. Les organismes et agences reconnues et classiquement consultées sont l'ANSES, l'US EPA, l'ATSDR, l'OMS, l'IPCS, l'OEHHA, le RIVM, Santé Canada, l'EFSA, le TPHCWG²². La note d'information de la DGS (note d'information DGS/EA1/DGPR/2014/307 du 31 octobre 2014 précise la méthodologie de choix des VTR).

Il est à souligner que les VTR étant élaborées en tenant compte des seules caractéristiques toxicologiques intrinsèques de chaque substance, il est possible que les calculs conduisent à des valeurs inférieures aux concentrations usuellement observées dans l'air des bâtiments [OQAI, 2006].

Mise en perspective par rapport au bruit de fond / concentrations usuellement observées dans l'air des bâtiments

En outre, les concentrations mesurées seront comparées aux concentrations de l'environnement local témoin (prélèvements témoins air intérieur et air extérieur), de « bruit de fond » et des concentrations usuellement observées dans l'air des bâtiments issues de la littérature, dont celles listées dans les documents de l'OQAI, de l'ANSES, des fiches toxicologiques de l'INERIS, etc. pour des environnements similaires, afin de s'assurer de leur cohérence dans les gammes mentionnées. Il sera également porté attention aux constats visuels et olfactifs effectués au cours des visites et des prélèvements.

²¹ Engagement n°152 suite au Grenelle de l'Environnement (2007)

²² Les VTR sont présentées dans les fiches toxicologiques de l'INERIS présentes sur le Portail Substances Chimiques à l'adresse suivante <http://www.ineris.fr/substances/fr/>

Ce rapport est basé sur les éléments disponibles au moment de sa rédaction, qui pourront faire l'objet de mises à jour, selon les retours d'expérience et les avancées en lien avec la problématique de gestion des sites et sols pollués et les futures normes.

7.3. ASSURANCE QUALITÉ

Les paramètres suivants, pour certains déjà évoqués dans les parties précédentes, sont des éléments essentiels à la bonne représentativité de l'échantillonnage des gaz du sol et de l'air intérieur :

- Réaliser des blancs de transport et des blancs de terrain pour évaluer l'impact des conditions de transport et des conditions propres au terrain sur les résultats obtenus.
- Prendre les précautions adéquates lors de prélèvements de gaz du sol ou d'air sous dalle réalisés dans un bâtiment en parallèle de prélèvements d'air intérieur (cf. 6.5).
- Une phase de purge à un débit similaire à celui du prélèvement et sur une durée adaptée doit être réalisée préalablement à chaque prélèvement de gaz du sol ;
- L'étanchéité des ouvrages de prélèvement de gaz du sol doit être garantie ;
- Tous les matériaux situés en amont du support de prélèvement (que ce soit la ligne de prélèvement en elle-même ou l'ouvrage de prélèvement) doivent être neutres chimiquement ;
- Les outils de forage doivent être nettoyés à l'eau claire et ensuite séchés afin d'éviter un transfert de sols contaminés d'un ouvrage à l'autre ;
- Le matériel de prélèvement réutilisable doit être nettoyé régulièrement et utilisé sur site en commençant par les zones les moins polluées et en finissant par les zones les plus impactées ;
- Le contrôle des débits doit être réalisé au minimum en début et en fin de prélèvement sur la ligne de prélèvement complète afin de prendre en compte l'ensemble des pertes de charges ;
- Une fiche de prélèvement complète doit être établie pour chaque point de prélèvement ;
- La qualité des supports de prélèvement peut être évaluée en réalisant des blancs d'échantillons.

Remarque

En cas d'interrogation sur des résultats d'analyse (résultats non conformes aux prévisions, doutes sur une éventuelle contamination...), il est recommandé de se tourner vers le laboratoire d'analyse afin de lui demander confirmation des résultats et le suivi qualité du (des) échantillon(s) concerné(s).

7.4. IDENTIFICATION DES SOURCES D'INTERFÉRENCES

Lors des campagnes de prélèvements, il peut être mis en évidence des paramètres pouvant perturber les prélèvements (conditions météorologiques, activités co-contributrices, sources internes (revêtement, mobilier...), dégradation de la qualité de l'air extérieur...). Il est donc nécessaire de porter attention à la représentativité des prélèvements / mesures effectuées au regard de la représentativité spatiale et temporelle et de corrélérer si cela est possible les gaz du sol avec l'air extérieur ou intérieur.

Pour les prélèvements actifs sur tube adsorbant, il est indispensable de vérifier les concentrations mesurées au niveau de la zone de contrôle du tube de prélèvement pour s'assurer de l'absence de saturation ou de tout autre phénomène amenant à la présence de composés en zone de contrôle et invalidant le prélèvement. Pour les tubes ne possédant pas de couche de contrôle, il est recommandé de placer deux supports en série. Il est à noter que pour certains adsorbants engendrant de fortes pertes de charges, la mise en série ne sera pas possible.

7.4.1. Remarque générale

Lors des prélèvements, en cas d'observation de nature à remettre en cause la validité des prélèvements, il peut être préférable d'interrompre la campagne en cours et de la renouveler dans des conditions et/ou avec des techniques plus adaptées (exemples : terrains gorgés d'eau, inondations des parties basses d'un bâtiment, rupture d'étanchéité en cours du prélèvement, activité parallèle émettant des composés volatils...).

7.4.2. Interférences potentielles liées aux prélèvements par conteneur sous dépression

Les conteneurs sous dépression constituent une méthode de prélèvement direct des gaz du sol, de l'air intérieur et/ou extérieur, permettant un prélèvement de l'ensemble des composés présents sans distinction de leur affinité avec un adsorbant ou une solution.

Cependant, les phénomènes suivants sont susceptibles d'interférer quant aux résultats d'analyse :

- microgouttelettes : en cas de prélèvement d'air humide, l'humidité de l'air prélevé peut se condenser à l'intérieur du conteneur sur les parois internes. Certains composés peuvent alors être captés par ces gouttelettes et ne plus être présents dans la phase gazeuse qui sera analysée, minimisant alors les concentrations pour ces composés.
- dégradation des composés : certains composés très réactifs peuvent se dégrader à l'intérieur du conteneur suite au prélèvement, minimisant alors les concentrations pour ces composés. C'est par exemple le cas de l'ammoniac (NH_3).

Remarque

Lors d'exposition à des forts niveaux de concentrations, les conteneurs peuvent nécessiter des opérations de nettoyage et de régénération renforcée (notamment pour les contaminants polaires et ceux ayant une température d'ébullition supérieure à celle du toluène). Il peut donc survenir des risques de contaminations résiduelles dans les conteneurs. En cas de doute sur ce type de contamination résiduelle, une demande d'information sur les contrôles effectués après le nettoyage peut être réalisée auprès du laboratoire.

7.4.3. Maîtrise des débits

Dans le cas de prélèvements actifs, divers facteurs peuvent influencer la stabilité du débit des pompes de prélèvement, il s'agit notamment :

- du temps de préchauffage du matériel si nécessaire,
- de la qualité de la batterie et du bloc pompe,
- de la perte de charge due au support de prélèvement qui peut augmenter au cours du prélèvement de gaz du sol.

En cas d'instabilité du débit au cours du prélèvement, le prélèvement pourrait ne pas être représentatif et devrait alors être renouvelé.

Les points et recommandations listées dans le tableau ci-dessous sont à prendre en compte pour la réalisation des prélèvements, les contrôles du débit, et l'interprétation des variations de débit :

Tableau 11 – Rappel des recommandations pour l'interprétation des variations de débit de prélèvement

Milieu concerné	Constat	Conséquences
Gaz du sol	Débit total > 2 L/min	Prélèvement non représentatif
Air intérieur / extérieur	Écart de débit ²³ < 5%	Prélèvement représentatif, débit moyen utilisé pour le calcul du volume prélevé
	Écart de débit > 5%	Prélèvement non représentatif
Gaz du sol	Écart de débit < 5%	Prélèvement représentatif, débit moyen utilisé pour le calcul du volume prélevé
	5% < écart de débit < 10%	Prélèvement représentatif, débit minimum mesuré utilisé pour le calcul du volume prélevé
	Écart de débit > 10%	Prélèvement non représentatif
Air intérieur / extérieur et Gaz du sol	Écart entre la somme des débits et le débit total > 10%	Prélèvement non représentatif

²³ Écart mesuré entre 2 contrôles de débit (début / fin, début / intermédiaire ou intermédiaire / fin)

Il est également rappeler les points suivants :

- utiliser des pompes de prélèvement respectant la norme NF ISO 13137 (Air des lieux de travail - Pompes pour l'échantillonnage individuel des agents chimiques et biologiques - Exigences et méthodes d'essai) et adaptées au débit de prélèvement envisagé.
- les débits sont à mesurer pour chaque support au minimum en début et fin de prélèvement, sur la ligne de prélèvement complète afin d'intégrer l'ensemble des pertes de charges.
- un contrôle régulier du débit peut permettre de détecter ces dérives rapidement, et d'opérer un réglage optimal des débits. Au-delà de 4 h de prélèvement, une mesure intermédiaire est à réaliser.

7.4.4. Saturation / défauts d'adsorption des supports de prélèvements

a) Causes de saturations / défauts d'adsorption les plus fréquents et actions préventives

Pour les supports de prélèvements actifs, une mauvaise adsorption et/ou une saturation du support de prélèvement peut être observée.

Les causes les plus classiques sont les suivantes :

- **Concentrations très importantes** : si les concentrations en composés volatils sont très élevées, le support de prélèvement pourra ne pas être en mesure d'adsorber l'ensemble des composés volatils (capacité d'adsorption limitée).

Action préventive : En cas de doute ou signal sur la présence de fortes concentrations, il est recommandé d'adapter les temps et débits de prélèvement et de placer un 2nd support en parallèle, avec un débit réduit afin de pouvoir l'analyser en cas de saturation du 1^{er} support.

- **Débit trop élevé** : si le débit appliqué est trop important par rapport au type de support et d'adsorbant retenu, la cinétique d'adsorption peut être perturbée et les composés volatils peuvent traverser le support trop rapidement pour être complètement piégés.

Action préventive : Pour éviter ce problème, il est recommandé de respecter les débits maximums de prélèvements préconisés dans les guides et normes de références (NIOSH, métropol...) et par les fabricants. Si le volume de prélèvement doit être augmenté par rapport aux préconisations des guides et normes de référence, il est recommandé d'augmenter la durée de prélèvement plutôt que le débit.

- **Taux d'humidité important dans l'air prélevé** : en cas de taux d'humidité très important dans l'air prélevé, cette humidité peut être adsorbée sur le support de prélèvement et ainsi diminuer la capacité de piégeage du support pour les composés volatils (compétition).

Action préventive : pour éviter ce problème en cas de fort taux d'humidité, il est recommandé de limiter au maximum le volume prélevé et de privilégier des supports adsorbants hydrophobes.

- **Conservation et transport** : Certains composés peuvent être mobiles à l'intérieur du support de prélèvement, y compris après les prélèvements. Certains composés peuvent en effet migrer le long du tube vers la plage de contrôle rendant l'échantillon inutilisable au bout de quelques jours.

Action préventive : il est donc recommandé de limiter au maximum les durées de conservation des échantillons avant leur analyse, et conserver les échantillons au frais et à l'abri de la lumière.

b) Évaluation de la saturation

Lorsque le support de prélèvement comporte une zone de mesure et une zone de contrôle, ou que deux supports ne comportant qu'une seule zone sont mis en série, il est demandé d'analyser systématiquement la zone de contrôle et la zone de mesure.

Le prélèvement est considéré comme valide lorsque **la masse de composés volatils présente dans la couche de contrôle** (ou support de contrôle) **est inférieure à 5 %** de celle déterminée dans la couche de mesure (norme NF X 43-267) pour chacun des composés analysés, ainsi que pour la somme des composés détectés.

Lorsque la **masse totale de composé** sur la **couche de contrôle est supérieure à 5%** de la **masse totale des composés** sur la **couche de mesure**, le prélèvement est considéré comme non conclusif. Les masses de composés ayant traversés le support de prélèvement sont supérieures aux sommes des masses des couches de mesure et de contrôle. Un résultat du type « $\geq X \mu\text{g}/\text{m}^3$ » peut être retenu pour l'ensemble des composés. La pertinence de l'utilisation de ce résultat sera jugée au regard des objectifs de l'étude.

Lorsque la **masse d'un composé** sur la **couche de contrôle est supérieure à 5%** de la **masse de ce même composé** sur la **couche de mesure**, le prélèvement est considéré comme **non conclusif uniquement pour ce composé**. La masse de ce composé ayant traversé le support de prélèvement est supérieur à la somme de la masse de la couche de mesure et de contrôle. Un résultat du type « $\geq X \mu\text{g}/\text{m}^3$ » peut être retenu pour le composé concerné. La pertinence de l'utilisation de ce résultat sera jugée au regard des objectifs de l'étude.

7.4.5. Incertitude liée au prélèvement

Toutes les incertitudes inhérentes aux prélèvements doivent être relevées : volume d'air prélevé (mesure et stabilité du débit de la pompe, durée du prélèvement), conservation de l'échantillon, transport de l'échantillon...

7.4.6. Incertitude liée à l'analyse

Les incertitudes sur les analyses (taux de récupération, variabilité de la méthode et étalonnage) doivent être explicitement demandées au laboratoire en amont de la réalisation de la campagne de caractérisation. En effet, en l'absence d'exigence réglementaire relative à l'application de la norme NF EN ISO/CE 17025, les incertitudes sur les analyses d'air ne sont pas obligatoirement

données par les laboratoires dans le domaine des sites et sols pollués. Le retour d'expérience montre que les incertitudes données par les laboratoires pour les analyses sur l'air sont de l'ordre de 10 à 30 % (en fonction des supports, des substances, des gammes de concentration...).

7.4.7. Interférences liées aux pollutions domestiques

Les composés volatils présents dans l'air intérieur, de nature physique, chimique ou biologique sont nombreux et leurs sources sont multiples. La visite du site et l'enquête réalisée (notamment à l'aide du questionnaire d'enquête préliminaire) permettra de déterminer au mieux les emplacements pour s'en affranchir et limiter leur influence.

Le guide [InVS, 2010] donne dans son annexe 9 les sources potentielles de composés volatils dans l'air intérieur en présentant une entrée par substance. Ce tableau est fourni en Annexe 7.

Lors de l'interprétation des données, il faudra commenter les résultats en prenant en compte ces éléments.

7.4.8. Variabilité temporelle

Plusieurs échelles de variations temporelles (horaire, journalier, saisonnier) du fait des conditions météorologiques (vent, température, pression, pluie) et du mode d'utilisation des occupants (conditions de chauffage et de renouvellement d'air) peuvent modifier les concentrations mesurées dans les gaz du sol, l'air intérieur en lien avec une pollution souterraine.

La typologie du bâtiment, ses fondations et les échanges d'air entre les volumes, les systèmes de ventilation, les pratiques des occupants, le mobilier, les revêtements de sols, les caractéristiques des sols et de la pollution sont autant de paramètres d'influence sur cette variabilité temporelle.

[LCSQA-INERIS, 2008] présente dans son annexe 6 les résultats d'une étude menée dans les Pays de la Loire. L'un des objectifs de cette étude est de calculer l'incertitude associée à l'estimation de la concentration moyenne annuelle en formaldéhyde. Il ressort de cette étude que l'incertitude est de 78% si un seul prélèvement est réalisé pendant l'année, tandis qu'elle est d'environ 25% à partir de deux prélèvements distincts.

Cette étude met donc en évidence qu'une mesure unique n'est pas représentative et cela est à prendre en compte, que les prélèvements soient réalisés dans un but de caractérisation des voies de transfert, de dimensionnement d'une source ou d'un panache de pollution, ou d'évaluation des expositions.

Lors de l'interprétation des données, il faudra commenter ou nuancer les résultats en prenant en compte ce facteur.

7.4.9. Volume d'échantillonnage des gaz du sol

En cas de prélèvements de volumes importants de gaz du sol, il peut exister un risque d'échange avec l'air atmosphérique, notamment en cas de prélèvement à

faible profondeur et/ou de sols très perméables (vérification nécessaire avec le rayon d'influence).

Le volume de prélèvement aura également une influence sur la représentativité de la mesure. Ainsi, dans le cas d'un petit volume de prélèvement (quelques litres), le résultat obtenu traduira une concentration « ponctuelle » des gaz du sol dans l'environnement immédiat de l'ouvrage de prélèvement (cf. scénario (a) de la Figure 34).

A l'inverse, dans le cas d'un volume de prélèvement important (ex : 50 l, 100l...) une dilution de la pollution pourrait se produire en captant des gaz du sol non impactés en même temps que de l'air contenant les substances volatiles recherchés (cf. scénario (b) de la Figure 34).

Il conviendra d'indiquer ces limites dans le rapport.

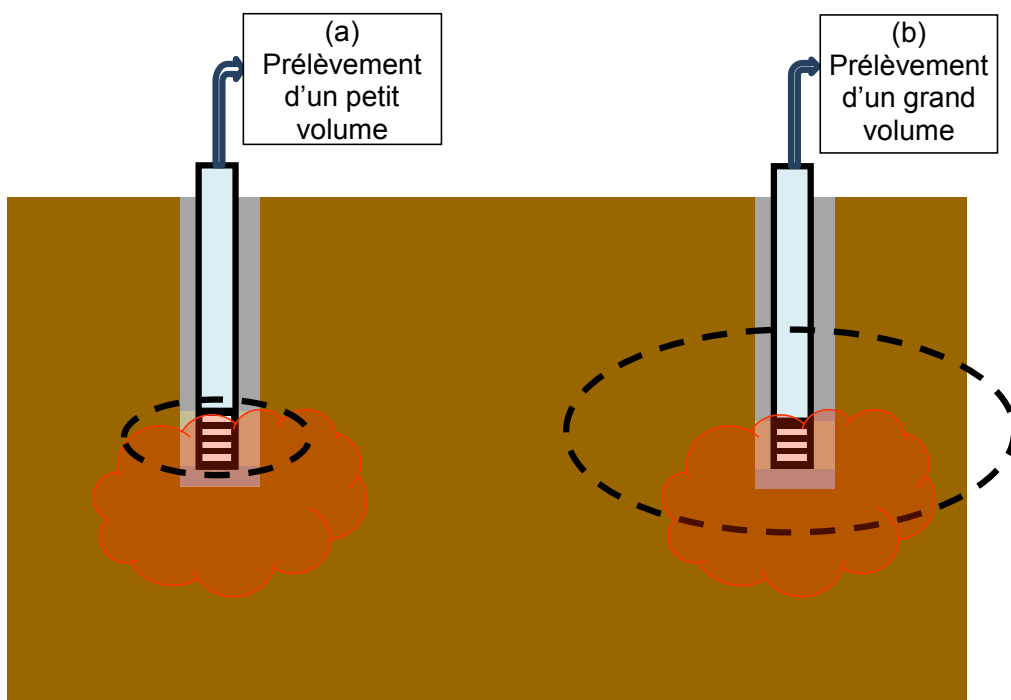


Figure 34 – Illustration théorique de l'influence du volume de pompage des gaz du sol sur les résultats obtenus

La connaissance du rayon d'influence du piézair au débit appliqué peut permettre de déterminer ou au moins d'apprécier les risques de dilution (notamment dans des cas de sources sols de petites dimensions).

7.4.10. Rayons d'influence et rayons de captage des prélèvements de gaz du sol

La définition des concepts des rayons d'influence et des rayons de captage est présentée ci-dessous :

- Le « rayon d'influence » est défini comme le rayon d'un volume de la zone non saturée situé autour de l'ouvrage de prélèvement au sein duquel, les gaz du sol sont soumis au mouvement convectif lié à la mise en dépression des sols par le phénomène de pompage (« zone d'influence ») ;
- Le « rayon de captage » est défini ici comme le rayon d'un volume de la zone non saturée situé autour de l'ouvrage de prélèvement et contenant un volume équivalent au volume qui est prélevé (« zone de captage »). Il y a de forte probabilité que les gaz du sol situés dans ces volumes soient captés lors des opérations de pompage.

Le rayon d'influence sera plus étendu que le rayon de captage car le pompage va entraîner une dépression dans les sols qui se répercutera au-delà du seul rayon de captage tel que défini ici.

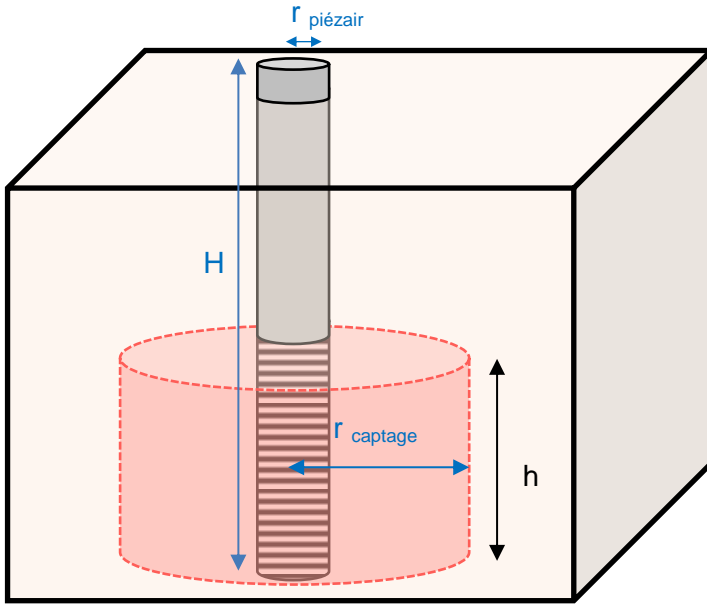
Ces rayons dépendent de la nature des sols, du type d'ouvrage de prélèvements ainsi que du volume d'air prélevé.

Plusieurs méthodes de calcul ou de modélisation peuvent être employées afin de déterminer les rayons de captage d'un prélèvement de gaz du sol.

La Figure 35 et la Figure 36 présentent des équations permettant de déterminer des rayons de captage théoriques soit cylindriques soit sphériques autour de la zone crépinée. L'approche sphérique pourrait être privilégiée pour des ouvrages présentant des zones crépinées de petite hauteur (par exemple 5 à 20 cm) car elle considère le centre de la sphère (équivalent à la zone crépinée où est aspiré l'air) comme ponctuel. L'approche cylindrique pourrait être privilégiée pour des ouvrages présentant des zones crépinées de hauteurs plus importantes (par exemple > 20 cm).

Point d'attention : les principes théoriques de détermination de ces rayons d'influence présentés ici sont basés sur une hypothèse de sols homogènes ce qui est rarement le cas. Des hétérogénéités géologiques ou anthropiques peuvent modifier fortement la morphologie de ces zones d'influence, et des voies de transfert préférentielles peuvent ainsi se créer.

Le Tableau 12 et le Tableau 13 fournissent des ordres de grandeur de rayons de captage théoriques calculés pour différents types de sols (considérés comme homogènes) et volumes de prélèvements. Ces rayons de captage ont été calculés pour des configurations cylindriques (Tableau 12) et sphériques (Tableau 13).



Calcul du rayon de captage potentiel cylindrique dans les sols

$$r_{\text{captage}} = \sqrt{\frac{V_{\text{prélevé}} - V_{\text{piezair}} + \pi (r_{\text{piezair}})^2 h}{\epsilon \pi h}}$$

Avec :

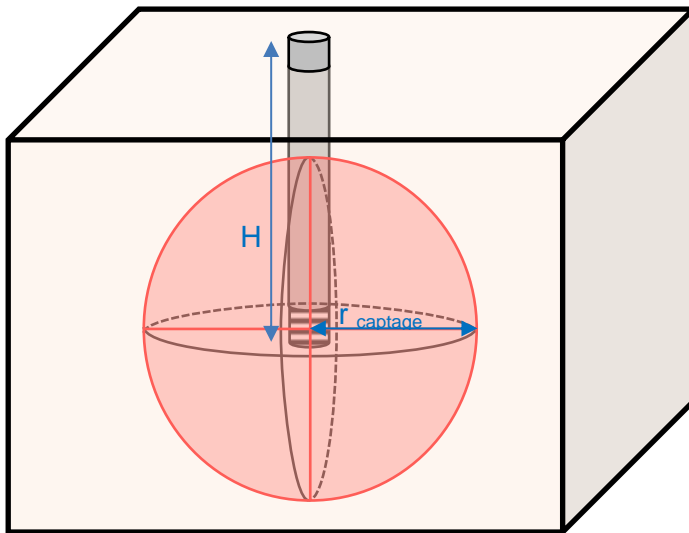
- ϵ : Porosité du sol
- H : hauteur du piézair
- h : hauteur de la zone crépinée
- V_{piezair} : Volume du piézair
- $V_{\text{prélevé}}$: Volume prélevé (purge incluse)
- r_{captage} : rayon de captage du piézair
- r_{piezair} : rayon interne du piézair

Rappel : calcul du volume d'un cylindre

- h : hauteur du cylindre
- r : rayon du cylindre

$$V_{\text{Cylindre}} = h \times \pi \times r^2$$

Figure 35 – Méthode de calcul pour la détermination du rayon de captage cylindrique d'un ouvrage de prélèvement de gaz du sol (source : d'après [CITYCHLOR, 2013])



Calcul du rayon de captage potentiel sphérique dans les sols

$$r_{\text{captage}} = \sqrt[3]{\frac{1}{\frac{4}{3} \times \pi} \times \frac{V_{\text{prélevé}} - V_{\text{piezair}}}{\epsilon}}$$

Avec :

- ϵ : Porosité du sol
- H : hauteur du piézair
- V_{piezair} : Volume du piézair
- $V_{\text{prélevé}}$: Volume prélevé (purge incluse)
- r_{captage} : rayon de captage du piézair

Rappel : calcul du volume d'une sphère

- r : rayon de la sphère

$$V_{\text{sphère}} = \frac{4}{3} \times \pi \times r^3$$

Figure 36 – Méthode de calcul pour la détermination du rayon de captage sphérique d'un ouvrage de prélèvement de gaz du sol

Tableau 12 – Estimations théoriques de rayons de captage cylindriques d'un ouvrage de prélèvement de gaz du sol dans des sols parfaitement homogènes

Type de sols	Volume de prélèvement	Porosité du sol	Volume de sol concerné (m ³)	Rayon de captage cylindrique théorique (m) pour une crépine de 20 cm de hauteur
Sables	240 L (1 L/min – 4h)	25%	0,96	1,24
Limons		50%	0,48	0,87
Argiles		70%	0,34	0,74
Sables	480 L (1 L/min – 8h)	25%	1,92	1,75
Limons		50%	0,96	1,24
Argiles		70%	0,69	1,04

Tableau 13 – Estimations théoriques de rayons de captage sphérique d'un ouvrage de prélèvement de gaz du sol dans des sols parfaitement homogènes

Type de sols	Volume de prélèvement	Porosité du sol	Volume de sol concerné (m ³)	Rayon de captage sphérique théorique (m) pour une crépine de 5 cm de hauteur
Sables	240 L (1 L/min – 4h)	25%	0,96	0,61
Limons		50%	0,48	0,49
Argiles		70%	0,34	0,43
Sables	480 L (1 L/min – 8h)	25%	1,92	0,77
Limons		50%	0,96	0,61
Argiles		70%	0,69	0,55

7.4.11. Risques de contamination

Tout évènement ou observation susceptible d'engendrer des incertitudes sur les résultats ou une contamination des échantillons doit être indiqué sur la fiche de prélèvement ainsi que dans le rapport d'échantillonnage (arrêt de la pompe sur une durée connue ou non, défaut d'étanchéité de la ligne de prélèvement, défaut d'étanchéité de l'ouvrage de prélèvement, observation de condensation sur la ligne de prélèvement ou dans les supports....).

Ces informations doivent être affichées en toute transparence afin de permettre une interprétation la plus précise et la plus fiable possible des résultats obtenus.

Afin de limiter les risques de contamination des échantillons, il est recommandé de :

- ne pas conditionner les échantillons d'air dans les mêmes glacières que des échantillons d'eau ou de sols. Il est à noter que si des contenants hermétiques à l'air (cylindre métallique ou pot en verre) fournis par les laboratoires permettaient un conditionnement étanche des supports de prélèvement, ces contenants hermétiques pourraient être transportés dans les mêmes glacières que des échantillons d'eau ou de sols ;
- ne pas fumer pendant la manipulation des supports de prélèvement ;
- utiliser des gants en latex lors de la manipulation des supports.

Remarque

La réalisation systématique des blancs de transport et de terrain peut permettre de détecter et quantifier les contaminations. Il convient de vérifier que la valeur des blancs est strictement inférieure à 10% des valeurs des échantillons. Si tel n'est pas le cas, les résultats de mesure devront être considérés avec précaution.

Les résultats d'analyse associés aux blancs devront être inclus dans les rendus de la campagne de prélèvements et s'intégreront dans le processus de validation des données.

8. Conclusion

Le prélèvement des gaz du sol et d'air intérieur, tels que décrits dans les prestations A230 (Prélèvements, mesures, observations et/ou analyses sur les gaz du sol) et A240 (Prélèvements, mesures, observations et/ou analyses sur l'air ambiant et les poussières atmosphériques) de la norme NF X 31-620-2 requièrent une bonne connaissance de ces milieux, de leurs spécificités et de leurs mécanismes de fonctionnement.

Ces prélèvements doivent être réalisés par du personnel formé à ces prélèvements, mesures, observations et analyses.

Ce guide présente un certain nombre de recommandations et de points d'attention afin que les prélèvements réalisés soient le plus représentatifs possibles de la qualité des gaz du sol et/ou de l'air intérieur. Ces recommandations concernent notamment :

- la stratégie de prélèvement en fonction des objectifs,
- la préparation de la campagne de prélèvement,
- la réalisation d'ouvrages de prélèvement,
- les méthodes de prélèvement d'air,
- la réalisation de prélèvements de gaz du sol, d'air intérieur et d'air extérieur,
- l'interprétation des résultats.

Certains contextes peuvent amener à des choix techniques différents de ceux recommandés dans le cadre de ce guide. Dans ce type de situation, un argumentaire détaillé devra être fourni pour justifier chacun des écarts aux recommandations formulées.

Des points de contrôle (contrôle des débits, mesures *in situ*...) développés dans ce guide pourront orienter le préleveur sur le terrain à vérifier la validité des prélèvements et, le cas échéant, à les renouveler (exemple : variation de débit >10% entre le début et la fin du prélèvement (cf. partie 6.4.4), condensation visible sur le support de prélèvement (cf. partie 7.4.4)...).

Le domaine d'application de ce guide concerne uniquement les gaz du sol et à l'air intérieur, mais n'intègre ni les composés particuliers, ni l'air des lieux de travail, exception faite des cas où les substances recherchées sont présentes dans les sols pour des raisons historiques et ne sont plus utilisées par la nouvelle activité.

9. Références normatives et documents de référence

De nombreux documents (normes et guides) concernant les prélèvements d'air existent.

Ces documents couvrent :

- les prélèvements d'air extérieur,
- les prélèvements d'air intérieur,
- les prélèvements d'air des lieux de travail.

Les normes développent des aspects particuliers, notamment :

- les composés recherchés (parfois seul un composé est concerné),
- les méthodes de prélèvements (souvent une méthode développée par norme),
- les aspects analytiques (la plupart des normes sont à destination des laboratoires),
- les aspects concernant les supports de prélèvements (certaines normes sont plutôt à destination des fabricants).

En préambule il est important de mentionner que la norme de service NF X 31-620 (juin 2011) « Qualité du sol – prestations de services relatives aux sites et sols pollués (études, ingénierie, réhabilitation de sites pollués et travaux de dépollution) » codifie les prestations en lien avec la pollution potentielle d'un site, ses impacts et les mesures de gestion (dépollution, prescriptions constructives, surveillance...) à mettre en œuvre. Cette norme est composée d'une partie générale et de trois parties consacrées aux trois grands métiers (étude, ingénierie et travaux) :

- X 31-620-1 : Exigences générales pour les prestations de services relatives aux sites et sols pollués,
- X 31-620-2 : Exigences dans le domaine des prestations d'études, d'assistance et de contrôle,
- X 31-620-3 : Exigences dans le domaine des prestations d'ingénierie des travaux de réhabilitation,
- X 31-620-4 : Exigences dans le domaine des prestations d'exécution des travaux de réhabilitation.

Pour chaque prestation et chaque livrable à destination du client, les objectifs et le contenu sont décrits dans la norme.

9.1. NORMES

France :

- NF ISO10381-7 (2006) Qualité du sol - Échantillonnage - Partie 7 : lignes directrices pour l'échantillonnage des gaz du sol ; **travail de révision en cours** (Future ISO 18400-204) ;
- NF X31-620-2 (2011) : Prestations de services relatives aux sites et sols pollués, Partie 2 : Exigences dans le domaine des prestations d'études, d'assistance et de contrôle, prestations A230 et A240 ;
- NF EN 14042 (2003) : Atmosphères des lieux de travail- Guide pour l'application et l'utilisation de procédures et de dispositifs permettant d'évaluer l'exposition aux agents chimiques et biologiques ;
- NF EN 1232 (1997) : Air des lieux de travail - Pompes pour l'échantillonnage individuel des agents chimiques - Exigences et méthodes d'essai.

Autres pays :

- Allemagne (VDI 3865-2, Measurement of organic soil pollutants - Techniques of active sampling of soil gas, 1998);
- ASTM (ASTM-D-5314-92, Standard Guide for Soil Gas Monitoring in the Vadose Zone, 2006).

9.2. GUIDES ET DOCUMENTS MÉTHODOLOGIQUES (LISTE NON EXHAUSTIVE)

- INRS, Nouveaux supports pour le prélèvement de polluants atmosphériques - Étude comparative, 2000 ;
- Projet FLUXOBAT, Evaluation des transferts de COV du sol vers l'air intérieur et extérieur. Guide méthodologique. Novembre 2013. 257 pp ;
- US EPA, Final project report for the development of an active soil gas sampling method, 2007;
- California Environmental Protection Agency, Advisory Active Soil Gas Investigation, 2012 ;
- USEPA, Development of a Sub-Slab Gas Sampling Protocol to Support Assessment of Vapor Intrusion ;
- Washington State Department of Ecology, Toxics Cleanup Program, Guidance for evaluating soil vapor intrusion in Washington State: Investigation and remedial action, 2009 New Jersey Department;
- ATTENA - Mode Opérateur - Apports et limitations de l'analyse des gaz du sol – phase 2 - Rapport final, ADEME, 2013
- CITYCHLOR - «Caractéristique et suivi des gaz du sol ; Design des ouvrages permanents (piézaires) et techniques de prélèvement » - Rapport provisoire juillet 2013.
- BRGM, Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes, 2008.
- BRGM, Guide relatif aux mesures constructives utilisables dans le domaine des SSP, 2014.

10. Bibliographie

Les documents cités dans ce guide sont référencés ci-après :

ADEME-INRS (2002) – Protection des travailleurs sur les chantiers de réhabilitation de sites pollués, ADEME-INRS – ED866 – 2002

ADEME (2016) - TEMPAIR - Synthèse publique. Variabilité temporelle des concentrations dans les gaz du sol et l'air intérieur - Evaluation des échantillonneurs passifs et des filtres anti-humidités dans les gaz du sol. A paraître dernier trimestre 2016

ANSES (2011) – Proposition de valeurs guides de qualité d'air intérieur - Évolution de la méthode d'élaboration des valeurs guides de qualité d'air intérieur – Avis de l'Anses – Rapport d'expertise collective – Saisine 2010–SA–0307. Avril 2011

ATTENA (2013) – Protocole opérationnel de gestion de sites par ATTEnuation NATurelle dans le contexte réglementaire français - Projet ATTENA – Phase 2 – ADEME – Janvier 2013

BRGM (2008) – Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes – Application dans un contexte de gestion des impacts sur les eaux souterraines – BRGM – 2008

BRGM (2014) – Guide relatif aux mesures constructives utilisables dans le domaine des SSP – rapport final – BRGM – BRGM/RP-63675-FR – Août 2014

CITYCHLOR (2013) – Groundwater, soil, soil gas and indoor air characterization - Technical book, CityChlor Interreg IV, INERIS, ADEME, 2013

FLUXOBAT (2013) – Traverse S., Schäfer G., Chastanet J., Hulot C., Perronnet K., Collignan B., Cotel S., Marcoux M., Côme J.M., Correa J., Gay G., Quintard M., Pepin L. (2013). Projet FLUXOBAT, Evaluation des transferts de COV du sol vers l'air intérieur et extérieur. Guide méthodologique. Novembre 2013. 257 pp (accessible sur www.fluxobat.fr)

HCSP – Haut Conseil de la Santé Publique - <http://hcsp.fr/explore.cgi/Accueil>

INERIS (2004) - Exposition par inhalation au benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes (BTEX) dans l'air - Sources, mesures et concentrations. INERIS-DRC-04-56770-AIRE-n°1056-IZd du 21/12/2004

INERIS (2008) – Evaluation des performances et des limites d'utilisation de deux méthodes automatiques (μ GC/TCD/MS et FTIR) pour la mesure de COV spécifiques en continu – Comparaison à la méthode manuelle. N° DRC-08-71309-09968A du 22/07/2008

INERIS (2009) – Mesure en continu du tétrachloroéthylène. Rapport DRC-09-94760-02389A – INERIS - 25/03/2009

INRS (2000) – Nouveaux supports pour le prélèvement de polluants atmosphériques - ND 2126-179-00 – INRS - 2000

INRS (2012) - Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France. Aide mémoire technique - ED 984. <http://www.inrs.fr/accueil/produits>

InVS (2010) – Environnement et santé – Guide pratique – Gestion de la qualité de l'air intérieur – Etablissements recevant du public – 2010

LCSQA-INERIS (2008) – Élaboration de protocoles de surveillance du formaldéhyde, du benzène et du monoxyde de carbone dans l'air des lieux clos ouverts au public – décembre 2008

LCSQA-INERIS (2011) – Tests métrologiques sur des analyseurs de mercure gazeux - DRC-11-118208-13544A – 2011

LCSQA-INERIS (2014) – Guide Méthodologique pour la Surveillance du benzène dans l'air ambiant (version 2014) - Convention n°2200876095 – Novembre 2014

MAPED (2002) – Indoor air sampling and evaluation guide. Massachusetts Department of Environmental Protection. WSC -02-430. 2002

MAPED (2011) – Interim Final Vapor Intrusion Guidance. Massachusetts Department of Environmental Protection. WSC -11-435. 2011

MEDAD (2007a) – Circulaire du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable relative aux « Installations classées ; prévention de la pollution des sols ; gestion des sols pollués, daté du 8 février 2007 - <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Circulaire-du-8-fevrier-2007,19383.html>

MEDAD (2007b) – Note du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable relative aux « Sites et sols pollués ; modalités de gestion et de réaménagement des sites pollués », Note et 3 annexes datées 8 février 2007 - <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Note-du-8-fevrier-2007-Sites-et.html>

OQAI (2006) – Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur, Campagne nationale logements. Etat de la qualité de l'air dans les logements français. Rapport final. DDD/SB-2006-57 de novembre 2006

OQAI (2010) – Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur, Hiérarchisation sanitaire des polluants de l'environnement intérieur : mise à jour pour le cas des logements et extrapolation à d'autres environnements intérieurs. Rapport n°ESE/Santé – 2010-095 de septembre 2010

Wiedersich,B. (1996) – Das Wetter. Entstehung – Entwicklung – Vorhersage. DTV Verlag, 1996

Annexe 1

**Points clés à prendre en compte pour l'implantation
d'ouvrages de prélèvement de gaz du sol**

informations disponibles / connues	OUI	NON	sans objet	Remarques
Hygiène & sécurité				
Plan de prévention complet et validé				
DICT réalisées				
Repérage des réseaux et des ouvrages souterrains				
Repérage et validation sur site de la localisation des ouvrages de prélèvement				
Port des EPI adaptés et mise à disposition des détecteurs appropriés (PID, multigaz, explosimètres...)				
Obtention des autorisations nécessaires				
Données disponibles				
Contexte géologique et hydrogéologique connu				
Données des précédents diagnostics consultées				
Données issues des études historiques et documentaires consultées				
Perméabilité des sols prise en compte				
Sources de pollutions identifiées et localisées				
Niveau de pollution et sa répartition connus				
Nature et comportement des polluants connus				
Spécificités de l'ouvrage de prélèvement				
Profondeur de prélèvement connue et compatible avec les données disponibles				
Profondeur de l'ouvrage < 1m de la surface du sol				
Profondeur de l'ouvrage > 1m du niveau des eaux souterraines				
Type d'ouvrage de prélèvement (air sous dalle, piézair, canne gaz...) compatible avec les objectifs et les données disponibles				
Présence de voies de transfert préférentielles des gaz dans les sols (zones plus perméables, tranchées, réseaux...),				
Présence de bâtiments à proximité ((≤ 10 m)				
Présence d'excavations, d'installations ou de travaux de nature à perturber le milieu gaz du sol à proximité (≤ 20 m)				
Rayon de captage des ouvrages de prélèvement connu ou estimé				

Annexe 2

Points clés à réaliser ou à prendre en compte lors de la réalisation de prélèvements de gaz du sol

Opération réalisée / Information prise en compte	OUI	NON	sans objet	Remarques
Préparation des investigations (avant intervention sur site)				
Finalité des investigations connue et prise en compte pour la détermination de la stratégie d'échantillonnage				
Méthode de prélèvement compatible avec les concentrations attendues et avec le milieu (prise en compte de la perméabilité du milieu, de l'humidité des gaz du sol...) et validation du laboratoire retenu				
Validation des LQ et paramètres prévisionnels de prélèvements permettant une atteinte des LQ compatibles avec les objectifs fixés				
Débits et durées de prélèvement déterminés				
Débits et durées de prélèvement compatibles avec le rayon de captage estimé de l'ouvrage (rayon ne recoupant pas d'autres ouvrages ni la surface du sol)				
Débit total de prélèvement des gaz du sol ne dépassant pas les 2 L/min				
Blancs de terrains et de transport prévus				
Délai d'attente minimum de 24h respecté pour les ouvrages ayant été créés par forage (piézairs)				
Opérations préalables au prélèvement				
Ouvrage maintenu fermé et étanche en dehors des phases de prélèvement				
Vérification de l'absence d'eau dans l'ouvrage				
Mesure des conditions météorologiques (température, pression barométrique, humidité relative, vitesse et sens du vent)				
Étanchéification de l'ouvrage avec des matériaux inertes (ciment, argile gonflante...) et contrôle de l'étanchéité				
Réalisation de la purge de l'ouvrage (5 fois le volume de l'ouvrage OU stabilisation des paramètres pertinents mesurés en continu) à un débit similaire à celui du prélèvement				
Mesures semi quantitatives réalisées (PID, O ₂ (permet d'observer un colmatage ou une mauvaise étanchéité de l'ouvrage), CO ₂ , H ₂ S, CH ₄ , CO)				
Mesure de la température et de l'humidité des gaz du sol				

informations disponibles / connues	OUI	NON	sans objet	Remarques
Mise en place de la ligne de prélèvement et réalisation des prélèvements				
Raccordement de l'ouvrage au support de prélèvement / et/ou à la pompe avec des capillaires adaptés aux composés volatils (de préférence PTFE (téflon® ; polytétrafluoroéthylène)), sinon PEHD ou PP)				
Ligne de prélèvement ne dépassant pas 1 m de longueur entre la tête de l'ouvrage et la pompe				
En cas de supports mis en parallèle, utilisation d'un système de répartition des flux				
Utilisation d'un filtre à poussière (si nécessaire) <i>Le choix du filtre à poussière doit s'effectuer en fonction des composés recherchés afin de ne pas interférer avec les analyses à réaliser.</i>				
Utilisation d'un filtre à humidité (si nécessaire) <i>L'utilisation de filtres à humidité en gel de silice est proscrite pour la caractérisation des solvants chlorés, et le choix du filtre à humidité doit s'effectuer en fonction des composés recherchés afin de ne pas interférer avec les analyses à réaliser.</i>				
Support de prélèvement contenant une couche de mesure et une couche de contrôle. <i>En cas d'absence de couche de contrôle, il est recommandé de mettre en place un 2nd support en série.</i>				
Contrôle des débits sur site réalisé sur la ligne de prélèvement complète et raccordée à l'ouvrage de prélèvement.				
Réglage des débits sur site et contrôle en début et en fin de prélèvement (contrôle intermédiaire pour les prélèvements ≥ 6h)				
Écart des débits inférieur à 10 % entre le début et la fin du prélèvement				
Identification, conditionnement et transport des échantillons				
Identification des supports sans étiquettes autocollantes, feutre ni colle				
Relevé des références propres à chaque support				
Conditionnement des échantillons dans une glacière équipé de pains de glace. <i>Les échantillons d'air doivent être conditionnés dans des contenants différents des prélèvements d'eau ou de sols afin d'éviter une contamination lors du transport.</i>				
Envoi des échantillons au laboratoire dans les délais préconisés par les normes ou les laboratoires				

Annexe 3

Check-list d'aide à la préparation de la campagne de mesures d'air intérieur

Aide à la préparation de la campagne de mesure d'air intérieur → check-list

Nom de l'opérateur / fonction :	Date : .. / .. / ..
Objectif de la campagne de mesure :	Ref. : _____

Les substances visées sont-elles identifiées ?	✓ ✗ oui non
	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

La finalité des mesures a-t-elle été définie ? Est-ce que la personne qui va sur le terrain s'est posé toutes les bonnes questions ?	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> si <input checked="" type="checkbox"/>
<i>cocher la finalité correspondante</i>	
<i>Nota : Si la campagne répond à plusieurs finalités, réaliser une fiche par finalité</i>	

- évaluation des expositions
- compréhension des transferts
- vérification de l'efficacité de mesures de gestion
- caractérisation des émissions vers l'air intérieur
- surveillance
- autre (préciser) :

- Les informations documentaires et historiques sur le site doivent toutes avoir été collectées**
- pollution des sols ou/et des eaux souterraines
 - rapports d'études précédentes
 - caractéristiques du bâtiment
 - ventilation et conditions d'utilisation des bâtiments
 - conditions d'accessibilité aux locaux vérifiées (sécurité si systèmes laissés sur site, branchement appareils...)

- Les points de prélèvement doivent avoir été définis en fonction des objectifs**
- sur le site (choix des pièces échantillonnées)
 - dans la pièce (choix de l'emplacement)
 - hauteurs des points de prélèvements
 - témoins prévus ?
 - le matériel nécessaire a été inventorié ? Y compris, matériel "connexe" aux mesures (bouteille étalon, débitmètre, chargeur, caisse à outils, glacière, étiquetage des prélèvements, docs utiles sur place)
 - le matériel pour les mesures des conditions météorologiques est-il inventorié ?
 - l'ensemble du matériel a-t-il été contrôlé : bon état de marche, étalonnage, contrôle météorologique en règle, ...
 - une attention a la stratégie temporelle a-t-elle été portée ? (chauffe ou non chauffe, conditions d'occupation par rapport à la finalité de la campagne /aération...)

- Détermination des paramètres de prélèvement (en collaboration avec le laboratoire lorsque nécessaire)**
- détermination de la technique de prélèvement
 - détermination de l'adsorbant
 - détermination des LD/LQ en fonction des objectifs et des concentrations attendues
 - détermination des débits et des durées de prélèvements
 - prévision des blancs (terrain, transport...)
 - logistique de réception des échantillons et conditionnement de l'envoi / des envois

- Le questionnaire ou l'enquête préalable**
- est-il adapté au site et à la problématique ?
 - est-il nécessaire d'en laisser un sur place (suivi de prélèvements plus longs)

- Mise en œuvre du dispositif de prélèvement**
- est-il adapté au site et à la problématique ?
 - si des pompes sont utilisées ont-elles bien été calibrées en amont ?
 - l'écart des débit est-il compatible avec une mesure valide ?

Annexe 4

**Questionnaire d'enquête préliminaire pour les
prélèvements d'air intérieur: « Renseignements sur le
bâtiment, les activités intérieures, les conditions de
mesures »**

Dénomination du bâtiment :		Date :
Un questionnaire pour l'ensemble du site étudié A remplir par l'opérateur avec l'aide du propriétaire ou d'un responsable du site		
1. Environnement extérieur à proximité (rayon de 500 m) ?		
1.1	Présence d'une nappe	
	Oui	
	Non	
	Si oui , préciser la gamme de profondeurs :	
	Autres renseignements (contamination connue, etc.) :	
1.2.	Situation routière ?	
	Autoroute	
	Route à fort trafic.....	
	Route à trafic modéré.....	
	Route à trafic faible.....	
1.3	Situation du site surveillé	
	Zone urbaine.....	
	Zone péri-urbaine.....	
	Zone industrielle	
	Zone rurale.....	
1.4	Présence d'une zone industrielle (rayon de 1 km) ?	
	Oui	
	Non	
	Si oui , préciser la nature des activités industrielles environnantes :	
	
1.5	Source de pollution potentielle environnante	
	Industrie (précisée au 1.2.).....	
	Parking	
	Tour de refroidissement.....	
	Aucune.....	
1.6	Nature de l'ancienne activité hébergée sur le site ? (industrielle ou non)	
	
2. Description générale du bâtiment		
2.1.	Année de construction	
2.2.	Nombre d'étages	
2.3.	Nombre de pièces	
2.4.	Usage du bâtiment	
	Bureaux	
	Logements.....	
	Mixte : préciser.....	
	Crèche.....	
	Scolaire / périscolaire.....	
	Autre : préciser.....	

2.5.	Type de construction	
	Moellon	
	Bois	
	Autre : préciser.....	
2.6.1.	Existence de pièce d'interface sol-bâtiment	
	Vide sanitaire.....	
	Parking enterré	
	Sous-sol.....	
	Cave.....	
	Autre : préciser.....	
2.6.2.	Nature de l'interface sol-bâtiment	
	Terre battue.....	
	Dalle béton (si connue préciser le type de dalle).....	
	Autre : préciser.....	
2.7.	Évènement important survenu dans le bâtiment	
	Incendie	
	Autre : préciser	
2.8.	Rénovation récente au niveau du bâti (moins de 6 mois) (ex : peintures)?	
	Oui.....	
	Non.....	
2.9.	Type d'assainissement	
	Collectif.....	
	Individuel.....	
2.10.	Énergie principale de chauffage	
	Gaz	
	Fioul	
	Électrique.....	
	Autre : préciser	
	Si chaudière : préciser le lieu.....	
	Si cuve de fioul : préciser le lieu.....	
2.10.1.	Fréquence d'utilisation d'un chauffage d'appoint en hiver	
	Toujours.....	
	Fréquemment.....	
	Occasionnellement.....	
	Jamais.....	
2.10.2.	Type de chauffage d'appoint	
	Fioul	
	Électrique.....	
	Autre : préciser	
2.11.	Présence d'un système spécifique de ventilation (extraction mécanique, ventilation naturelle par conduit)/climatisation	
	Oui / Non	
2.12.	Présence d'un garage attenant au bâtiment ?	
	Oui / Non.....	
2.13.	Présence d'une porte entre le garage et l'habitation ?	
	Oui / Non	
2.14.	Dans quelle pièce cette porte donne-t-elle ? Est-elle laissée ouverte ? Un véhicule est-il habituellement garé dans le garage ?	
	
	

3. Description de la pièce investiguée	Dénomination :.....	Témoins <input type="checkbox"/> Échantillon <input type="checkbox"/>
Prévoir un questionnaire par pièce étudiée pour cette partie		
3.1. A quel étage se situe la pièce étudiée ?		
RdC.....		
1er		
2 ^{ème}		
3 ^{ème}		
4 ^{ème}		
Sous-sol		
Autre : préciser		
3.2. Rénovation de la pièce (depuis moins de 6 mois) ?		
Oui		
Non		
Si oui -> 3.2.1. (si non -> question 3.3.)		
3.2.1. Type de revêtement au sol		
Moquette		
Parquet (type de parquet, ciré ? huilé ? vitrifié ?).....		
Carrelage		
Sol plastique		
Autre : préciser		
3.2.2. Mode de fixation du revêtement au sol		
Posé		
Collé		
3.2.3. Type de revêtement aux murs		
Papier-peint		
Toile de verre + peinture		
Peinture seule (peinture à l'eau ? glycérophthalique ?).....		
Plâtre peint.....		
Bois (lambris)		
Moquette murale.....		
Autre : préciser		
3.2.4. Présence de faux plafond ?		
Oui		
Non		
3.3. Mobilier neuf (depuis moins de 6 mois) ?		
Oui		
Non		
Si oui -> 3.3.1. (si non -> question 3.4.)		
3.3.1. Type et nature du mobilier		
Aggloméré/contreplaqué		
Massif		
3.4. Les entrées d'air sont-elles dégagées ?		
Oui		
Non		
Pas d'entrée d'air		

3.5.	Nature des éléments de distribution de chaleur	
	Radiateurs/convecteurs	
	Sol	
	Climatisation	
3.5.1.	Le réglage de la température peut-il être modifié par les occupants ?	
	Oui	
	Non	
3.6.	Y-a-t-il une source de combustion dans la pièce ?	
	Poêle	
	Cheminée	
	Gazinière	
	Chauffe-eau.....	
	Autre : préciser	
3.7.	Un système de ventilation spécifique est-il présent dans la pièce ?	
	Oui.....	
	Non	
	Si oui -> 3.7.1. (si non -> question 3.8.)	
3.7.1.	Quel est le type de système de ventilation spécifique ?	
	Ventilation naturelle (grilles ou conduits).....	
	Ventilation mécanique contrôlée	
3.7.2.	Quel est l'état des bouches d'aération ou des bouches de soufflage ?	
	Bon.....	
	Moyen	
	Mauvais	
3.8.	Type de fenêtre : ouvrables ?	
	Oui	
	Non	
3.8.1.	Type de vitrage	
	Simple	
	Double	
	Triple.....	
3.9.	Vecteurs privilégiés de transfert au sein même de la pièce	
	Lavabos, éviers	
	Canalisations, tuyauteries.....	
	Gaines électriques	
	Autres vecteurs (points singuliers, trappes d'accès, regards, trous...).....	
3.9.1.	Vérification de l'état des parois et de la dalle de la pièce (fissures...)	
	Bon état.....	
	Mauvais état	
	Pas d'accès visuel facile à la dalle	
3.9.2.	Nature et état du sol	
	Terre battue.....	
	Dalle béton (si connu, préciser).....	
	- Type (portée...).....	
	- Epaisseur.....	
	- Etat de la dalle (présence de fissures ?).....	
	- Fissures de retrait ?.....	
	Autres vecteurs (points singuliers, trappes d'accès, regards, trous...).....	

3.9.3. Nature et état du plafond	Nature.....			
	Bon état / mauvais état.....			
	Présence de points singuliers, trappes d'accès, trous.....)			
3.10. Stockage de produits chimiques/entretiens/hydrocarbures dans la pièce du prélèvement ?	Oui			
	Non			
3.11. Stockage de produits chimiques/entretiens/hydrocarbures dans une pièce voisine ?	Oui			
	Non			
4. Activité et observations²⁴ des occupants avant et pendant l'échantillonnage et en temps normal				
4.1 Les mesures sont-elles réalisées en conditions d'occupation normale des locaux	Oui			
	Non			
4.2. Population occupant la pièce échantillonnée		Avt	Pdt	Nor
	Enfants.....			
	Nouveau-nés.....			
	Adultes			
	Personnes âgées			
4.2.1. Durées usuelles des activités dans la pièce	Horaires approximatifs passés à l'intérieur de la pièce			
			
	Total du temps passé à l'intérieur de la pièce			
4.3. Plaintes ou signalements relatifs à des odeurs ou à des troubles ?		Avt	Pdt	Nor
	Oui			
	Non			
4.4. Fréquence du nettoyage de la pièce			
4.4.1. Nature des produits utilisés (javel, cire...)			
4.4.2. Lieu de stockage des produits d'entretien utilisés			
4.4.3. Le nettoyage du local a-t-il eu lieu pendant la période du prélèvement ou la veille ?	Oui			
	Non.....			
4.5. Des activités spécifiques ont-elles eu lieu durant le prélèvement?		Avt	Pdt	Nor
	Collage, utilisation de marqueurs			
	Activités de loisirs (dessin, peinture, ...)			
	Activités mécaniques.....			
	Bricolage			
	Cuisson d'aliments			
	Jardinage (herbicides...)			
	Autres : préciser.....			
Pdt : pendant le prélèvement ; Avt : sur les quelques jours précédents ; Nor : en temps normal.				

²⁴ A distinguer des observations du préleveur reportées sur la fiche de prélèvement (Annexe 1).

4.6.	Présence de fumeurs / de cendriers dans la pièce échantillonnée ?		Pdt	Nor
	Oui			
	Non.....			
4.7.	Présence d'un photocopieur / imprimante ?			
	Oui			
	Non			
4.8.	Utilisation d'insecticide, de répulsifs à insectes ou d'antimite dans la pièce ?	Avt	Pdt	Nor
	Oui			
	Non.....			
4.9.	Habitudes de vie		Pdt	Nor
	Utilisation de barbecue.....			
	Stockage de produits de beauté, savons, dissolvant.....			
	Parfums, désodorisant, vêtements revenant du pressing			
4.10.	Y a-t-il eu un évènement inhabituel durant le prélèvement (dans les locaux ou à l'extérieur à proximité (incendie, groupe électrogène mis en marche, etc.))			
	Oui			
	Non.....			
5. Activité des équipements pendant et avant l'échantillonnage				
5.1.	Nombre d'appareils à combustion utilisés simultanément dans la pièce étudiée			
5.1.1.	Sont-ils tous raccordés à l'extérieur ?	Avt	Pdt	Nor
	Oui			
	Non.....			
5.1.2.	Fréquence d'utilisation			
	En continu			
	Plusieurs fois sur une durée de mesure.....			
	Une fois sur une durée de mesure.....			
	Jamais			
5.1.3.	Nature du combustible utilisé dans les appareils à combustion	Avt	Pdt	Nor
	Gaz			
	Pétrole.....			
	Bois.....			
	Charbon			
	Radiateur à huile.....			
	Autre			
	Aucune (pas d'utilisation du chauffage d'appoint).....			
5.2.	D'autres sources de combustion ont-elles été utilisées (bougies, encens, cigarette,...)	Avt	Pdt	Nor
	Oui			
	Non.....			
5.3	Ventilation			
5.3.1.	Une VMC fonctionne-t-elle ?	Avt	Pdt	Nor
	Oui (préciser le type de VMC)			
	Non.....			
5.3.2.	Fréquence d'ouverture des fenêtres (préciser le cas échéant)			
	En continu			
	Plusieurs fois sur une durée de mesure.....			
	Une fois sur une durée de mesure.....			
	Jamais			
Pdt : pendant le prélèvement ; Avt : sur les quelques jours précédents ; Nor : en temps normal.				

5.3.2. Fréquence d'ouverture des portes (préciser le cas échéant)			
En continu			
Plusieurs fois sur une durée de mesure.....			
Une fois sur une durée de mesure.....			
Jamais			
5.4 Chauffage :	Avt	Pdt	Nor
5.4.1. Réglage du chauffage (curseur)			
5.4.2. Température dans la pièce (°C)			
6. Activité extérieure pendant l'échantillonnage			
6.1. Chantier se faisant à proximité de la pièce durant le prélèvement			
Oui			
Non.....			
Si oui, descriptif rapide			
.....			
Pdt : pendant le prélèvement ; Avt : sur les quelques jours précédents ; Nor : en temps normal.			

Annexe 5

Exemple de fiche de prélèvement de gaz du sol

Mesures semi quantitatives des gaz du sol avant prélèvement									
Paramètre	PID	CO2	O2	H2S	CH4	CO	Température	Humidité relative	Autres
Unité									
Valeur									
Contrôle du débit (échantillonnage actif avec pompe)									
Référence unique de chaque support	Type de support			T0 (début)	T1 (intermédiaire)	T2 (fin)	Volume prélevé		
			Temps débit (l/min)						
Contrôle des paramètres de prélèvements (échantillonnage passif)									
Référence laboratoire du support	Type de support			T0 (début)	T1 (fin)	Observations			
			Temps						
			Temps						
			Temps						
Contrôle des paramètres de prélèvements par canister (échantillonnage actif dynamique)									
Référence unique de chaque canister	Volume du canister			T0 (début)	T1 (intermédiaire)	T2 (fin)	Observations		
			Temps						
			Pression dans le canister						
Conditionnement et transport									
Laboratoire de destination :					Transporteur :				
Type de conditionnement :					Date et heure de remise au transporteur :				
Substances recherchées									
Autres observations									

Photographies du point de prélèvement	
<i>Vue de l'environnement du point de mesure</i>	<i>Vue générale du dispositif de prélèvement (point de prélèvement jusqu'à la pompe)</i>
<i>Zoom sur la ligne de prélèvement</i>	<i>Prise de vue après le prélèvement</i>

Annexe 6

Exemple de fiche de prélèvement d'air intérieur / extérieur

Contrôle du débit (échantillonnage actif avec pompe)						
Référence laboratoire du support	Type de support		T0 (début)	T1 (intermédiaire)	T2 (fin)	Volume prélevé
		Temps				
		débit (L/min)				
		Temps				
		débit (L/min)				
		Temps				
		débit (L/min)				
Contrôle des paramètres de prélèvements (échantillonnage passif)						
Référence laboratoire du support	Type de support		T0 (début)	T1 (fin)	Observations	
		Temps				
		Temps				
		Temps				
Contrôle des paramètres de prélèvements par canister (échantillonnage actif dynamique)						
Référence unique de chaque canister	Volume du canister		T0 (début)	T1 (intermédiaire)	T2 (fin)	Observations
		Temps				
		Pression dans le canister				
Conditionnement et transport						
Laboratoire de destination :			Transporteur :			
Type de conditionnement :			Date et heure de remise au transporteur :			
Substances recherchées						
Autres observations						

Photographies du point de prélèvement	
<i>Vue de l'environnement du point de mesure</i>	<i>Vue générale du dispositif de prélèvement (point de prélèvement jusqu'à la pompe)</i>
<i>Zoom sur la ligne de prélèvement</i>	

Annexe 7

**Annexe informative : Sources potentielles de
polluants de l'air intérieur (entrée par substance)
(source : Annexe 9 du Guide [InVS-DGS, 2010])**

Famille	Composés particuliers	Exemples de sources	+/-*	Typologies de sources
Gaz de combustion	Monoxyde de carbone (CO)	- Pollution urbaine extérieure dont trafic automobile	-	Environnement extérieur Air extérieur/Sources diffuses
		- Appareils de chauffage et de production d'eau chaude	+	Équipements et hygiène générale Dysfonctionnement CVC
		- Fumées de tabac	+	Occupants/Activités Vie quotidienne
Gaz inorganique	Ammoniac	- Présence humaine fumées de tabac produits d'entretien	+	Occupants/Activités Vie quotidienne
		- Pollution urbaine extérieure dont trafic automobile	+	Environnement extérieur Air extérieur/Sources diffuses
	Oxydes d'azote (NO _x)	- Combustion du gaz	+	Équipements et hygiène générale Dysfonctionnement CVC
		- Matériaux de construction neufs ou peu anciens (source indirecte)	+	Matériaux et ameublements Matériaux neufs ou peu anciens
	Ozone	- Photocopieuses anciennes (les plus récentes sont équipées de filtre à ozone) (source indirecte)	+	Équipements et hygiène générale Équipements de bureau
		- Pollution urbaine extérieure dont trafic automobile (source indirecte)	-	Environnement extérieur Air extérieur/Sources diffuses
	Radon	- Sol	+	Environnement extérieur Sols pollués/Sources enterrées
- Matériaux de construction		-	Matériaux et ameublements Matériaux anciens et/ou dégradés	
	- Dégazage de l'eau à usage sanitaire	-	Environnement extérieur Sols pollués/Sources enterrées	
Biocontaminants - Allergènes	Pollens	- Pollens extérieurs via ouvrants ou systèmes de ventilation ou de traitement de l'air	-	Environnement extérieur Air extérieur/Sources diffuses
		- Pollens extérieurs transportés via chevelure, chaussures ou vêtements	-	Occupants/Activités Vie quotidienne

* - = pollutions mineures ; + = pollutions potentiellement importantes.

Famille	Composés particuliers	Exemples de sources	+/-*	Typologies de sources
- Micro-organismes	Autres allergènes	- Insectes, nuisibles, animaux (chiens, chats, acariens)		Équipements et hygiène générale Insectes/Nuisibles
	Acaréens	- Poussières dans textiles : literies (matelas, sommiers, tapisseries, couettes, oreillers, canapés et fauteuils en tissus, tissus d'ameublement, tapis et moquettes...) - Taux d'humidité élevé		Équipements et hygiène générale Poussière
	Micro-organismes infectieux (bactéries, virus)	- Réseau d'assainissement et évacuation des eaux usées - Systèmes de traitement d'air	+	Équipements et hygiène générale Réseau d'évacuation eaux usées
		- Squames cutanées, bioaérosols par la toux et les éternuements	+	Équipements et hygiène générale Dysfonctionnement CVC
		- Transport via les vêtements, allergènes de chats ou chiens, activités diverses...	+	Occupants/Activités Vie quotidienne
		- Occupants avec des maladies transmissibles	+	Occupants/Activités Vie quotidienne
	Moisissures et spores fongiques	- Sols, végétaux et tout substrat organique humide via les ouvrants, les systèmes de ventilation ou de traitement de l'air - Façades et cloisons	+	Occupants/Activités Vie quotidienne
		- Produits de construction et de décoration	-	Environnement extérieur Air extérieur/Sources diffuses
		- Ameublement souillé ou endommagé par l'eau	+	Matériaux et ameublements Matériaux anciens et/ou dégradés
		- Endroits humides, mal ventilés, chauds et sombres (atrium, pots, vides sanitaires...) - Chevelure, chaussures ou vêtements	+	Matériaux et ameublements Matériaux anciens et/ou dégradés Matériaux anciens et/ou dégradés Équipements et hygiène générale Humidité/Zones humides Occupants/Activités Vie quotidienne

* - = Pollutions mineures ; + = pollutions potentiellement importantes

Famille	Composés particuliers	Exemples de sources	+/-*	Typologies de sources
Composés organiques semi-volatils (COSV) - Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	Naphtalène	- Chauffage résidentiel - Répulsifs antimites	+ -	Équipements et hygiène générale Dysfonctionnement CVC Occupants/Activités Vie quotidienne
	Autres HAP	- Adjuvant des plastifiants	+	Environnement extérieur Air extérieur/Sources diffusées
		- Phénomènes de combustion	+	Matériaux et ameublements Matériaux neufs ou peu anciens Occupants/Activités Vie quotidienne
	- Polybromodiphénylét her (PBDE)	- Pesticides	- Retardateurs de flamme dans les matériaux plastiques	+
Biocides				Occupants/Activités Loisirs et bricolage
- Phthalates	Lindane (usage aujourd'hui interdit)	- Préservation du bois		Matériaux et ameublements Matériaux neufs ou peu anciens
	Pentachlorophénol (usages autorisés mais restreints)	- Préservation du bois		Matériaux et ameublements Matériaux neufs ou peu anciens
	Pyréthrine	- Lutte contre les insectes, traitement des plantes		Occupants/Activités Loisirs et bricolage
	DEHP	- Plastifiants : fragrances, rideaux de douche... - Conteneurs pour la nourriture		Matériaux et ameublements Matériaux neufs ou peu anciens Occupants/Activités Vie quotidienne

* - = pollutions mineures; + = pollutions potentiellement importantes

Famille	Composés particuliers	Exemples de sources	+/-*	Typologies de sources
Composés organiques volatils (COV) -Acides organiques		- Revêtements muraux et de sols, peintures, colles, isolants, mobilier...	+	 Matériaux et ameublements Matériaux neufs ou peu anciens
	-Alcools	- Solvants à queux		 Matériaux et ameublements Matériaux neufs ou peu anciens
		- Plastifiants - Revêtements muraux et de sols, peintures, colles, isolants, mobilier...		Matériaux et ameublements Matériaux neufs ou peu anciens
		- Feutres	+	 Occupants/Activités Vie quotidienne
-Aldéhydes		- Photochimie	-	 Environnement extérieur Air extérieur/Sources diffusées
		- Panneaux de bois brut, panneaux de particules, isolants	+	 Matériaux et ameublements Matériaux neufs ou peu anciens
		- Fumée de cigarettes	+	 Occupants/Activités Tabac
		- Photocopieurs	+	 Équipements et hygiène générale Équipements de bureau
	- Gaz d'échappement	+	 Environnement extérieur Air extérieur/Sources diffusées	
	- Fumée de cigarettes, combustion et chauffage des graisses animales et végétales	+	 Occupants/Activités Tabac	
	- Peintures à phase solvant, parquet traité	+	 Matériaux et ameublements Matériaux neufs ou peu anciens	
	- Photocopieurs	+	 Équipements et hygiène générale Équipements de bureau	
	- Photochimie	-	 Environnement extérieur Air extérieur/Sources diffusées	
	- Panneaux de particules, panneaux de fibres en bois agglomérés	+	 Matériaux et ameublements Matériaux neufs ou peu anciens	






* - = pollutions mineures ; + = pollutions potentiellement importantes.

Famille	Composés particuliers	Exemples de sources	+/-*	Typologies de sources
		<ul style="list-style-type: none"> - Panneaux de bois brut, peintures à phase solvant, matériaux contenant des composés à base de formaldéhyde (liants ou colles urée-formol) - Livres et magazines neufs 	+	<p>Matériaux et ameublements</p> <p>Matériaux neufs ou peu anciens</p>
		<ul style="list-style-type: none"> - Produits d'usage courant (produits d'entretien et de traitement, produits d'hygiène corporelle et cosmétiques) - Combustion, fumée de cigarettes - Photocopieurs 	+	<p>Occupants/Activités</p> <p>Vie quotidienne</p>
	Hexaldéhyde	<ul style="list-style-type: none"> - Panneaux de particules et de bois brut, peintures à phase solvant - Livres et magazines neufs, produits de traitement du bois (phase aqueuse) - Photocopieurs 	+	<p>Occupants/Activités</p> <p>Vie quotidienne</p>
	Isobutyraldéhyde	<ul style="list-style-type: none"> - Photocopieurs 	+	<p>Équipements et hygiène générale</p> <p>Équipements de bureau</p>
	Butyraldéhyde	<ul style="list-style-type: none"> - Photocopieurs 	+	<p>Équipements et hygiène générale</p> <p>Équipements de bureau</p>
	Isovaléraldéhyde	<ul style="list-style-type: none"> - Parquet traité, panneaux de particules 	+	<p>Matériaux et ameublements</p> <p>Matériaux neufs ou peu anciens</p>
	Valéraldéhyde	<ul style="list-style-type: none"> - Livres et magazines neufs 	+	<p>Occupants/Activités</p> <p>Vie quotidienne</p>
	Autres aldéhydes	<ul style="list-style-type: none"> - Peintures à phase solvant, panneaux de particules - Revêtements muraux et de sols, peintures, colles, isolants, mobilier... 	+	<p>Matériaux et ameublements</p> <p>Matériaux neufs ou peu anciens</p>
	- Cétones	<ul style="list-style-type: none"> - Revêtements muraux et de sols, peintures, colles, isolants, mobilier... 		<p>Matériaux et ameublements</p> <p>Matériaux neufs ou peu anciens</p>

*. - = pollutions mineures ; + = pollutions potentiellement importantes.

Famille	Composés particuliers	Exemples de sources	+/-*	Typologies de sources
- Esters	2-butoxyéthyl acétate	- Solvants hydrophiles et lipophiles, peintures, colles, encres, vernis, diluants		Matériaux et ameublements
	Butyl acétate	- Cosmétiques, produits d'entretien		Occupants/Activités
	Autres esters	- Parquet, solvant		Matériaux et ameublements
		- Revêtements muraux et de sols, peintures, colles, isolants, mobilier...		Matériaux et ameublements
		- Feutres		Occupants/Activités
- Ethers de glycol	1-méthoxy-2-propanol	- Laques, peintures, vernis, solvants hydrophiles et lipophiles, colles, encres		Matériaux et ameublements
	2-butoxyéthanol	- Savons, cosmétiques, produits d'entretien		Occupants/Activités
		- Solvants hydrophiles et lipophiles, peintures, colles, encres		Matériaux et ameublements
	2-éthoxyéthanol	- Vernis, diluants, traitement du bois, calfatage siliciné		Matériaux et ameublements
		- Cosmétiques, produits d'entretien, fongicide, herbicide		Occupants/Activités
	Autres éthers de glycol	- Peinture, laques, vernis		Matériaux et ameublements
		- Revêtements muraux et de sols, peintures, colles, isolants, mobilier...		Matériaux et ameublements
		- Produits de nettoyage et d'entretien		Occupants/Activités

* - = pollutions mineures ; + = pollutions potentiellement importantes.

Familie		Composés particuliers	Exemples de sources	+/-*	Typologies de sources	
- Hydrocarbures aromatiques	BTEX	- Pollution urbaine extérieure dont trafic automobile			Environnement extérieur	Air extérieur/Sources diffusées
		- Terrains contaminés par d'anciennes activités industrielles (gaz du sol)			Environnement extérieur	Sols pollués/sources entrées
		- Fumée de cigarette			Occupants/Activités	Loisirs et bricolage
	1,2,4 triméthylbenzène	- Solvants pétroliers, carburants, goudrons			Occupants/Activités	Loisirs et bricolage
		- Vernis			Matériaux et ameublements	Matériaux neufs ou peu anciens
	Benzène	- Carburants		+	Environnement extérieur	Air extérieur/Sources diffusées
		- Fumée de cigarette		+	Occupants/Activités	Tabac
	Éthylbenzène	- Produits de bricolage		+	Occupants/Activités	Loisirs et bricolage
		- Ameublement, produits de construction et de décoration		-	Matériaux et ameublements	Matériaux neufs ou peu anciens
		- Gaz d'échappement			Environnement extérieur	Air extérieur/Sources diffusées
	Styrène	- Cires			Occupants/Activités	Vie quotidienne
		- Matières plastiques, matériaux isolants			Matériaux et ameublements	Matériaux neufs ou peu anciens
		- Carburants			Environnement extérieur	Air extérieur/Sources diffusées
	Toluène	- Fumée de cigarette			Occupants/Activités	Tabac
		- Carburants			Environnement extérieur	Air extérieur/Sources diffusées
Xylènes	- Peintures, vernis, colles, encres, moquettes, tapis, caillatage siliconé			Occupants/Activités	Loisirs et bricolage	
	- Peinture, vernis, colles			Matériaux et ameublements	Matériaux neufs ou peu anciens	
	- Insecticides			Occupants/Activités	Loisirs et bricolage	












* - = pollutions mineures ; + = pollutions potentiellement importantes.

Famille	Composés particuliers	Exemples de sources	+/-*	Typologies de sources
- Hydrocarbures halogénés	1,1,1-trichloroéthane	- Colles		Matériaux et ameublements Matériaux neufs ou peu anciens
	1,4-dichlorobenzène	- Antimites, désodorisant, laupide		Occupants/Activités Vie quotidienne
	Composés organo-phosphorés	- Lutte contre les insectes, traitement des plantes - Terrains contaminés par d'anciennes activités industrielles (gaz du sol)		Occupants/Activités Loisirs et bricolage
	Dichloroéthylène	- Terrains contaminés par d'anciennes activités industrielles (gaz du sol)		Environnement extérieur Sols pollués/Sources enterrées
	Tétrachloroéthylène	- Dégraissant, émissions processus de nettoyage à sec		Pollutions spécifiques (laboratoires, art technique...)
		- Terrains contaminés par d'anciennes activités industrielles (gaz du sol)		Environnement extérieur Sols pollués/Sources enterrées
	Trichloroéthylène	- Peintures, vernis, colles		Matériaux et ameublements Matériaux neufs ou peu anciens
		- Dégraissant métaux		Occupants/Activités Loisirs et bricolage
		- Terrains contaminés par d'anciennes activités industrielles (gaz du sol)		Environnement extérieur Sols pollués/Sources enterrées
	- Hydrocarbures aliphatiques	Cyclohexane	- Peintures, vernis, colles	
Décane		- White-spirit, cire, vernis à bois, nettoyant sol		Occupants/Activités Loisirs et bricolage
		- Moquettes, tapis, colles pour sol		Matériaux et ameublements Matériaux neufs ou peu anciens
n-décane, n-undécane		- White-spirit, cire, vernis à bois, nettoyant sol		Occupants/Activités Loisirs et bricolage
		- Moquettes, tapis, colles pour sol		Matériaux et ameublements Matériaux neufs ou peu anciens
Autres hydr. Aliphatiques		- Revêtements muraux et de sols, peintures, colles, isolants, mobilier...		Matériaux et ameublements Matériaux neufs ou peu anciens

* - = Pollution mineures; + = pollution potentiellement importantes

Famille	Composés particuliers	Exemples de sources	+/-*	Typologies de sources	
- Terpènes		- Produits de nettoyage et d'entretien		Occupants/Activités Loisirs et bricolage	
	Alpha-pinène	- Désodorisant, parfum d'intérieur, produit d'entretien		Occupants/Activités Vie quotidienne	
- Divers	Limonène	- Désodorisant, parfum d'intérieur, cire nettoyant sol		Occupants/Activités Vie quotidienne	
		- Matériaux de construction neufs ou peu anciens		Matériaux et ameublements Matériaux neufs ou peu anciens	
		- Peintures, nouveaux meubles, planchers, équipement de bureau, revêtements muraux et de sols, peintures, colles, encres, adhésifs, isolants, mobilier...		Matériaux et ameublements Matériaux neufs ou peu anciens	
		- Laboratoires scientifiques, zone d'art technique		Pollutions spécifiques (laboratoires, art technique...)	
		- Dessin, produits de soins personnels, feutres		Occupants/Activités Vie quotidienne	
		- Combustion (fioul, charbon, bois), produits de nettoyage et d'entretien		Occupants/Activités Vie quotidienne	
		- Sol		Environnement extérieur Sols pollués/Sources entrées	
		- Vides sanitaires, sous-sols		Équipements et hygiène générale Caractéristiques de construction	
	Particules - Fibres	Amiante	- Matériaux amiantés dégradés		Matériaux et ameublements Matériaux anciens et/ou dégradés
			- Amiante naturelle		Environnement extérieur Air extérieur/Sources diffusives
Fibres minérales artificielles		- Conduits dégradés		Équipements et hygiène générale Dysfonctionnement CVC	
		- Matériaux fibreux, laines d'isolation		Matériaux et ameublements Matériaux anciens et/ou dégradés	

* - = pollution mineure ; +/- = pollution potentiellement importante.

Famille	Composés particuliers	Exemples de sources	+/-*	Typologies de sources
- Particules en suspension		- Proximité d'un chantier/atelier		Environnement extérieur Air extérieur/Sources diffuses
		- Pollution urbaine extérieure dont trafic automobile		Environnement extérieur Air extérieur/Sources diffuses
		- Air extérieur pollué		Équipements et hygiène générale Caractéristiques de construction
		- Conduits dégradés, vides sanitaires, sous-sols		Occupants/Activités Vie quotidienne
		- Combustion foin, charbon, bois		Occupants/Activités Vie quotidienne
Métaux - Plomb		- Proximité d'un chantier/atelier/industrie		Environnement extérieur Air extérieur/Sources diffuses
		- Peintures au plomb		Matériaux et ameublements Matériaux anciens et/ou dégradés
		- Objets en plomb		Occupants/Activités Vie quotidienne
		- Sites pollués par le plomb		Environnement extérieur Sols pollués/Sources enterrées
Paramètres de confort		- Vides sanitaires, sous-sols, défaut de bâti, d'isolation, dégâts des eaux		Équipements et hygiène générale Caractéristiques de construction
		- Métabolisme humain		Occupants/Activités Vie quotidienne

* - = pollutions mineures ; + = pollutions potentiellement importantes.

Annexe 8

Exemples de montages constatés

<p>Illustration en rouge : montages posant problèmes en vert : bonnes pratiques</p>	<p>Explications en rouge : montages posant problèmes en vert : bonnes pratiques</p>
	<p>Capillaire de prélèvement long de plusieurs mètres pour un prélèvement de gaz du sol.</p> <p>Il est recommandé que la longueur des lignes de prélèvement soit inférieure à 1 m entre la tête de l'ouvrage de prélèvement et la pompe.</p> <p>Des lignes trop longues peuvent entraîner des réchauffements / refroidissements du gaz prélevé et/ou sa condensation dans le tubage avant son prélèvement. Elles entraînent également des pertes de charges plus importantes.</p>
	<p>Prélèvement d'air sous dalle réalisé au travers d'un plancher ne possédant finalement pas de dalle sous-jacente. L'étanchéité a été réalisée en utilisant un gant de terrain en tissu afin de maintenir les flexibles.</p> <ul style="list-style-type: none"> • l'étanchéité du montage est inefficace, • il y a des risques de contamination liés aux gants de terrain, • en l'absence de dalle et avec cette mauvaise étanchéité, le prélèvement aurait dû être modifié / annulé.
	<p>Étanchéité d'un prélèvement d'air sous dalle réalisée en utilisant du scotch et non des matériaux neutres (bentonite par exemple) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • il y a de très forts risques de contamination lié aux solvants présents dans la colle du scotch utilisé. En cas de recherche de COHV ou BTEX, ces prélèvements seraient invalides. <p>L'étanchéité aurait dû être réalisée à l'aide de bentonite (cf. 5.3).</p>


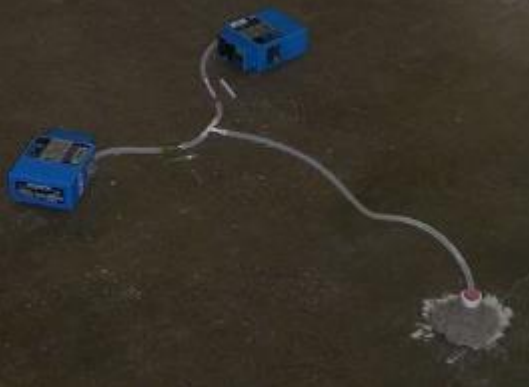
Illustration en rouge : montages posant problèmes en vert : bonnes pratiques	Explications en rouge : montages posant problèmes en vert : bonnes pratiques
 	<p>Chaines de prélèvements d'air sous dalle trop complexes avec :</p> <ul style="list-style-type: none">- Jusque 6 supports mis en série ou en parallèle pour une seule pompe- Raccords en « T » simples sans système de régulation des flux <p>Ce montage trop complexe et sans système de régulation ne permet pas de maîtriser les flux passant dans chacun des supports.</p>
	<p>Chaine de prélèvement d'air sous dalle simple avec :</p> <ul style="list-style-type: none">- Une bonne étanchéité réalisée avec de la bentonite,- Une pompe par support afin de maîtriser les débits passant dans chaque support.

Illustration en rouge : montages posant problèmes en vert : bonnes pratiques	Explications en rouge : montages posant problèmes en vert : bonnes pratiques
	<p>étanchéité d'un prélèvement d'air sous dalle réalisé en bentonite.</p> <p>Ce type d'étanchéité est conforme aux recommandations de ce guide car réalisée avec un matériau modelable et inerte (bentonite)</p> <p>Ligne de prélèvement simple limitant les risques d'interférences</p>
	<p>Mesure sur site à l'aide d'un PID accordé à un piézair équipé d'une valve.</p> <p>Ce type d'ouvrage permanent équipé d'une valve permet un raccordement simple et fiable à l'aide du capillaire, et permet de laisser le piézair obturé en dehors des phases de prélèvement.</p> <p>La mesure sur site à l'aide d'un PID permet de détecter la présence de certains COV et peut permettre d'adapter les paramètres de prélèvement en cas d'indices de fortes concentrations.</p>

Annexe 9

Caractéristiques des principaux types d'adsorbants

(d'après camSCO sorbent selection chart-3.0)

Guide pratique pour la caractérisation des gaz du sol et de l'air intérieur
en lien avec une pollution des sols et/ou des eaux souterraines

Surface spécifique (m2/g)	Densité (g/cm3)	Temp Max °C	Temp Désorption °C	Adsorbant (adsorbant équivalent)	granulométrie (mesh)	Plage de volatilité des analytes (nb de carbone & température d'ébullition)	hydrophilie	Composés analysables	Remarques
800 (1700)	N/A	400	325	Anasorb CMC (CMS)	variable	C3 ~ C4 -60 ~ 80°C	+	Composés très volatils : fréons, composé halogénés (méthyl chloride, dichlorométhane...), acétone, propène, Fluorure de sulfuryle	Surface spécifique importante. Utilisable en désorption chimique et thermique. Comparable au carboxieve S-III et similaire au Carboxen 1000/1003.
980	N/A	350	N/A Solvant	Anasorb 747 (charbon actif en granulés)	20/40	C2 ~ C5	-	Composés polaires et non polaires Adsorbant similaire aux charbons actifs mais plus adaptés aux composés polaires. Ex : dichlorométhane, méthanol, cétones, acrylates, oxyde de propylène	Surface spécifique importante. Capacité de piégeage des vapeurs organiques similaires à celles du charbon actif.
1060	0.45	400	330	Carboxieve S-II	60/80 80/100	C1 ~ C2	+	gaz permanents (H2, O2, Ar, CO & CO2) et hydrocarbures C1-C2 (méthane, éthane, éthylène, acétylène)	Forte capacité de piégeage des petites molécules (volume de claquage élevé).
820	0.61	400	330	Carboxieve S-III	60/80	C2 ~ C4 -60 ~ 80°C	+	gaz permanents (H2, O2, Ar, CO & CO2), hydrocarbures C2-C4, chlorométhane	Forte capacité de piégeage des petites molécules (volume de claquage élevé). Comparable à Anasorb CMC et similaire au Carboxen 1000/1003.
1160	0.49	200	190	Carboxieve G	variable	C1 ~ C3	Nd	gaz permanents et hydrocarbures C2-C3	Forte capacité de piégeage des petites molécules (volume de claquage élevé). Faible perte de charge
510	0.55	400	330	Carboxen 563 (Ambersorb 340)	20/45	C3 ~ C5 50 ~ 200°C	--	Composés organiques C2-C4	Faible perte de charge. Très hydrophobe. Adsorbant similaire au Carboxen 564.
400	0.59	400	330	Carboxen 564 (Ambersorb 347)	20/45	C2 ~ C5	--	Composés organiques C2-C5	Faible perte de charge. Très hydrophobe. Adsorbant similaire au Carboxen 563

Surface spécifique (m ² /g)	Densité (g/cm ³)	Temp Max °C	Temp Désorption °C	Adsorbant (adsorbant équivalent)	granulométrie (mesh)	Plage de volatilité des analytes (nb de carbone & température d'ébullition)	hydrophilie	Composés analysables	Remarques
485	0.61	400	330	Carboxen 569	20/45	C2 ~ C5	--	similaire aux Carboxen 563 et 564	Très hydrophobe. Adsorbant similaire au Carboxen 563 et 564, avec une meilleure capacité d'adsorption des molécules organiques, et une affinité moindre avec l'eau
1200	0.52	400	300	Carboxen 1000 (Carboxen 572) [Carbosphere] {Purosieve}	40/60 60/80 80/100 (20/45)	C2 ~ C4 -60 ~ 80°C	++	gaz permanents (H ₂ , O ₂ , Ar, CO & CO ₂), hydrocarbures C2-C4, chlorure de vinyle	Très hydrophile. A ne pas utiliser dans des conditions humides.
500	0.61	400	330	Carboxen 1001	60/80	C2 ~ C5	-	similaire au Carboxen 569	adsorbant similaire au Carboxen 569 en capacité d'adsorption et hydrophobie.
1000	0.46	400	330	Carboxen 1003	40/60	C2 ~ C5	--	gaz permanents (H ₂ , O ₂ , Ar, CO et CO ₂) et hydrocarbures légers C2-C5	Surface spécifique importante. Similaire au Carbosieve S-III et Anasorb CMS, en plus hydrophobe.
1100	0.50	400	330	Carboxen 1012		C4 ~ C6	Nd	Composés organiques C4-C6	inerte.
75	0.40	400	330	Carboxen 1016	60/80	C3 ~ C9	Nd	Composés organiques C3-C9	Plus faible surface spécifique que les autres tamis moléculaires de carbone
675 (600)	0.60 (0.62)	400	330	Carboxen 1018 (Carboxen 1021)		C2 ~ C3	-	éthane, acétylène, acétaldéhyde et hydrocarbures légers C2-C3	inerte et hydrophobe
600 ~ 1000	N/A	400	300	Molecular Sieve 5Å	variable	-60 ~ 80°C	++	gaz permanents et protoxyde d'azote	Très hydrophile. A ne pas utiliser dans des conditions humides.
600 ~ 1000	N/A	350	300	Molecular Sieve 13X		-60 ~ 80°C	++	gaz permanents et 1,3-butadiene	Très hydrophile. A ne pas utiliser dans des conditions humides.
1200	N/A	400	350	Unicarb (Sphero carb)	60/80	C3 ~ C8 -30 ~ 150°C	+	Composés polaires et non polaires, très volatils mais de grande taille (ex : hexafluorure de soufre)	inerte
560	N/A	400	350	Carbograph 5TD	variable	C3 ~ C8 50 ~ 150°C	-	hydrocarbures légers C3-C8	Grande stabilité thermique. Hydrophobe.

Surface spécifique (m2/g)	Densité (g/cm3)	Temp Max °C	Temp Désorption °C	Adsorbant (adsorbant équivalent)	granulométrie (mesh)	Plage de volatilité des analytes (nb de carbone & température d'ébullition)	hydrophilie	Composés analysables	Remarques
100 (100) [100 ~ 200]	0.35 (0.37)	400 (400) [400]	325 (325)	Carbopack B (Carbotrap B) [Anasorb GCB1] {Carbograph 1}	60/80 (20/40) [Variable] {Variable}	C5 ~ C12 >75°C (C5 ~ C12) [C5 ~ C12]	-	Composés non polaires moyennement volatils à très volatils ex : cétones, alcools, aldéhydes (hors formaldéhyde), fluorocarbures [GCB1 est adapté pour les hydrocarbures aliphatiques et aromatiques]	Grande stabilité thermique. Hydrophobe. Faible pertes de charges.
10 (10) [10~13]	0.68 (0.68)	400	325	Carbopack C (Carbotrap C) [Anasorb GCB2] {Carbograph 2}	60+ (20/40) [Variable] {Variable}	C8 ~ C20	-	En général, le carbopack C étend la capacité du carbopack B à des molécules avec des poids moléculaires plus élevés que ceux captés par le carbopack B. Ex: alkyl benzènes, hydrocarbures aliphatiques C8-C20, PCBs, HAPs	Grande stabilité thermique. Hydrophobe. Faible pertes de charges. Faible surface spécifique.
5 (5)	0.64 (0.69)	400	325	Carbopack F (Carbotrap F)	60/80 (20/40)	C9 ~ C30 Esp. > C20	-	En général, le carbopack F étend la capacité du carbopack B à des molécules avec des poids moléculaires plus élevés que ceux captés par le carbopack B. Hydrocarbures C9-C30	Grande stabilité thermique. Hydrophobe. Faible surface spécifique.
240 (240)	0.41 (0.43)	400	400	Carbopack X (Carbotrap X)	40+ 60/80 (20/40)	C3 ~ C5 80 ~ 145°C	-	Hydrocarbures légers : 1,3-Butadiene, benzène, toluène, et xylène	Grande stabilité thermique. Hydrophobe.
24 (24)	0.42 (0.45)	400	325	Carbopack Y (Carbotrap Y)	60+ (20/40)	C12 ~ C20	-	Hydrocarbures semi-volatils C12-C20	Grande stabilité thermique. Hydrophobe. Situé entre les carbopack C et B en terme d'adsorption.
220	0.18	400	325	Carbopack Z	60/80 (20/40)	C3 ~ C9	-	hydrocarbures volatils C3-C9	Grande stabilité thermique.
NA	NA	NA	NA	Solutions de barbotage	NA	Variable	-	variable en fonction de la solution (ex: bisulfite de sodium pour le formaldéhyde, KOH ou NaOH pour HCN, H2SO4 pour ammoniac...)	-

Surface spécifique (m ² /g)	Densité (g/cm ³)	Temp Max °C	Temp Désorption °C	Adsorbant (adsorbant équivalent)	granulométrie (mesh)	Plage de volatilité des analytes (nb de carbone & température d'ébullition)	hydrophilie	Composés analysables	Remarques
NA	NA	NA	NA	Filtre à quartz imprégné	NA	Variable	Nd	variable en fonction de la solution d'imprégnation (ex: acétate de cadmium pour H ₂ S, NaOH pour HCN, H ₂ SO ₄ pour ammoniac...)	-
750	0.76	200	180	Gel de silice	60/80 80/100	eau, composés polaires	++	composés polaires avec des températures d'ébullition faible	Hydrophile (retiens jusque 40% de sa propre masse en eau). Peut être dopé chimiquement pour certaines applications. Faible affinité pour les composés non polaires.
nd	nd	nd	nd	Soda lime	nd	-	Nd	CO ₂ , HCN	le soda lime est un mélange constitué d'environ 75% Ca(OH) ₂ , 20% H ₂ O, 3% NaOH et 1%KOH
200	nd	nd	nd	Hopcalite (Anasorb C300)	nd	-	Nd	mercure minéral	l'Hopcalite est un mélange constitué principalement d'oxyde de manganèse et d'oxyde de cuivre
1070 (1200)	0.57	400	180	Charbon actif de noix de coco (Anasorb CSC)	20/40 60/80	C2 ~ C5 -80 ~ 50°C	+	Surface spécifique importante. Large gamme de composés organiques non polaires.	Grande capacité d'adsorption pour les composés volatils à semi volatils (plus élevée que les carbosieve S-III et Anasorb CMS). Utilisé principalement en désorption chimique.
1050	0.50	400	180	Charbon actif provenant des résidus du raffinage du pétrole (JXC)	20/40 (20/40)	C2 ~ C5 -80 ~ 50°C	+	Surface spécifique importante. Large gamme de composés organiques polaires et non polaires.	Grande capacité d'adsorption pour les composés volatils à semi volatils (plus élevée que les carbosieve S-III et Anasorb CMS). Utilisé principalement en désorption chimique.
330	1.02	190	N/A Solvant	Amberlite XAD-2 (Supelpak-2)	20/60	spécifique	-	HAPs, pesticides chlorés, organotriphosphates, composés hydrophobes avec poids moléculaires pouvant atteindre 20 000.	Surface spécifique modérée. Utilisé principalement en désorption chimique.
725	1.02	150	N/A Solvant	Amberlite XAD-4	20/60	spécifique	-	composés organiques chlorés, pesticides organophosphorés, phénols	Surface spécifique plus importante que le XAD-2. Similaire au Anasorb 727 et Chromosorb 106

Surface spécifique (m2/g)	Densité (g/cm3)	Temp Max °C	Temp Désorption °C	Adsorbant (adsorbant équivalent)	granulométrie (mesh)	Plage de volatilité des analytes (nb de carbone & température d'ébullition)	hydrophilie	Composés analysables	Remarques
450	1.24	nd	nd	Amberlite XAD-7	20/60	nd	-	composés avec poids moléculaires pouvant atteindre 60 000.	
900	1.08	nd	nd	Amberlite XAD-16	20/60	nd	-	composés hydrophobes avec poids moléculaires pouvant atteindre 40 000.	Surface spécifique plus importante que le XAD-2
700 ~ 800	N/A	250	225	Anasorb 727	20/40	C5 ~ C12 50 ~ 200°C	--	adsorbant équivalent au Chromosorb 106	Surface spécifique importante. Très hydrophobe. Utilisable en désorption chimique et thermique. Similaire au XAD-4 et Chromosorb 106
350	0.29	250	225	Chromosorb 102	Variable	C5 ~ C12 50 ~ 200°C	-	large gamme de COVs : composés oxygénés, halogénés, pesticides chlorés avec point d'ébullition >40°C	Inerte, hydrophobe.
700 ~ 800	0.28	250	225	Chromosorb 106	Variable	C5 ~ C12 50 ~ 200°C	-	Hydrocarbures avec des températures d'ébullitions faibles (benzène, composés oxygénés...)	Inerte, hydrophobe. Similaire au XAD-4 et Chromosorb 106
400 ~ 500	0.30	250	225	Chromosorb 107	Variable	jusqu'à 150°C	-	acétate de vinyle, formaldéhyde, acétylène, composés soufrés. Non recommandé pour les glycols et amines	Adsorbant polaire et hydrophobe.
100 ~ 200	0.30	250	225	Chromosorb 108 (Anasorb 708)	Variable	jusqu'à 150°C	-	molécules polaires : alcools, eau, aldéhydes, glycols	Adsorbant polaire et hydrophobe.
526	0.36	165	150	HayeSep A	Variable	C0 ~ C2	+	gaz permanents (H2, O2, Ar, CO H2S) , eau	Adsorbant hydrophile.
608	0.33	190	180	HayeSep B	Variable	C1 ~ C2	++	amines C1-C2, ammoniac, eau	Adsorbant très hydrophile.
442 (650)	0.34	250 (250)	225	HayeSep C (Chromosorb105)	Variable	NOx, COx et SOx	+	cyanure d'hydrogène, ammoniac, H2S, eau	Adsorbant hydrophile. Similaire au Chromosorb 104.

Surface spécifique (m2/g)	Densité (g/cm3)	Temp Max °C	Temp Désorption °C	Adsorbant (adsorbant équivalent)	granulométrie (mesh)	Plage de volatilité des analytes (nb de carbone & température d'ébullition)	hydrophilie	Composés analysables	Remarques
795	0.33	290	180	HayeSep D	Variable	jusqu'à 160°C	++	composés avec des poids moléculaires faibles : acétylène, CO, CO2, composés soufrés	Adsorbant très hydrophile.
405 (300)	0.36 (0.38)	165 (190)	150 (160)	HayeSep N (Porapak N)	Variable	C5 ~ C8 50 ~ 150°C	++	composés azotés (acrylonitrile, acetonitrile, propionitrile), pyridine, alcools, éthanol, méthyl éthyle cétone	Adsorbant très hydrophile.
165 (150)	0.42 (0.27)	250 (250)	225 (225)	HayeSep P (Porapak P / PS)	Variable	jusqu'à 200°C	-	Esters, éthers, cétones, alcools, hydrocarbures, acides gras, aldéhydes et glycols. Non recommandé pour les amines et anilines	Adsorbant hydrophobe.
582 (550)	0.35 (0.34)	275 (250)	250 (225)	HayeSep Q (Porapak Q / QS)	Variable	C5 ~ C12 50 ~ 200°C	-	adsorbant équivalent au chromosorb 106. Non recommandé pour les amines et anilines	Adsorbant hydrophobe.
344 (525)	0.32 (0.30)	250 (250)	225 (225)	HayeSep R (Porapak R)	Variable	jusqu'à 200°C	Nd	Esters, éthers, composés azotés. Non recommandé pour les amines et les glycols	-
583 (375)	0.33 (0.35)	250 (250)	225 (225)	HayeSep S (Porapak S)	Variable	jusqu'à 200°C	Nd	Amines, amides, alcools, aldéhydes, cétones Non recommandé pour les acides, les glycols et les nitriles	-
250 (300)	0.38 (0.43)	165 (190)	150 (160)	HayeSep T (Porapak T)	Variable	jusqu'à 150°C	++	composés avec des poids moléculaires faibles : acétylène, CO, CO2, composés soufrés	Adsorbant très hydrophile.
35	0.28	350	300	Tenax TA	20/35 60/80	C6 ~ C26 100 ~ 400°C	-	Composés non polaires, aromatiques (sauf benzène) et semi volatils.	surface spécifique faible. Volume de claquage assez faible. Hydrophobe et inerte

Surface spécifique (m ² /g)	Densité (g/cm ³)	Temp Max °C	Temp Désorption °C	Adsorbant (adsorbant équivalent)	granulométrie (mesh)	Plage de volatilité des analytes (nb de carbone & température d'ébullition)	hydrophilie	Composés analysables	Remarques
24	0.41	350	300	Tenax GR	20/35 60/80	C7 ~ C30 100 ~ 450°C	-	HAPs, PCBs, alkyl benzène	surface spécifique faible. Hydrophobe et inerte

Légende

Tamis moléculaires de carbone / Carbon Molecular Sieves (CMS)
Carbone graphite noir / (Graphitized Carbon Black (GCB))
Autres matériaux
Polymères poreux


--	Adsorbant très hydrophobe
-	Adsorbant hydrophobe
+	Adsorbant hydrophile
++	Adsorbant très hydrophile


na : non applicable



Nd : non déterminé


Annexe 10



Fiches descriptives des principales méthodes de prélèvement


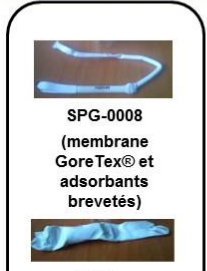




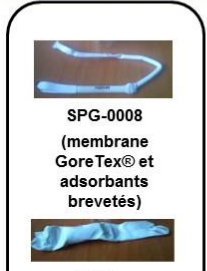




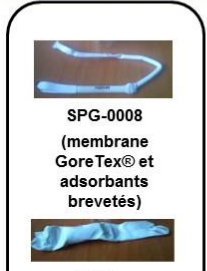



Type de prélèvement	Tubes actifs à adsorption		
Paramètres de prélèvements et gamme de concentrations	<ul style="list-style-type: none"> - Gamme de concentrations : 0,1 µg/m³ à 1 000 mg/m³ selon l'adsorbant et la méthode d'analyse - Durée de prélèvement comprise entre 15 min et 24h (en fonction des LQ recherchées, des caractéristiques du milieu et des recommandations constructeurs en termes de volume d'air maximum notamment) - Débits de pompage : 0,05 à 2 L/min (respecter le débit recommandé dans les méthodes de référence) 		
Exemples de composés concernés	Analyse quantitative d'une large gamme de composés volatils ou semi volatils (en fonction du support et de l'adsorbant retenu) : COHV, BTEX, HCT, HAP, aldéhydes, phénols,...		
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Permet de prélever des volumes d'air importants - Mise en œuvre simple. Toutefois, il convient de respecter les procédures pour la mise en œuvre de la chaîne de prélèvement et les étapes amont (saturation, choix LD/LQ...) 		
Inconvénients / limites	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite un contrôle rigoureux du débit - Nécessite la sorption et la désorption des composés, avec des rendements d'extraction fonction des composés et des supports de prélèvement - Interférence possible de l'humidité - Le risque de saturation doit être maîtrisé (mise en place ou existence d'une couche de contrôle), et si nécessaire les volumes prélevés doivent être adaptés - Phénomène de compétition entre les composés - Le bruit engendré par la pompe peut être gênant en fonction des lieux de prélèvement (ex : chambre) - Certains supports réutilisables (supports avec adsorbant à désorption thermique) nécessitent un nettoyage rigoureux (régénération) avant réutilisation 		
Conclusion	<p>Méthode simple à mettre en œuvre et utilisable pour la plupart des composés gazeux, permettant le prélèvement d'un volume d'air important</p> <p>Cette méthode est la plus couramment utilisée en France</p> <p>L'Annexe 9 présente des caractéristiques pour les principaux types d'adsorbant disponibles avec notamment le type de composés analysables sur ces adsorbants, et l'hydrophobicité des différents types d'adsorbant</p> <p>Cette dernière information est utile notamment pour les prélèvements des gaz du sol, en raison de la forte humidité de ce milieu. D'une manière générale, il est recommandé de privilégier les adsorbants hydrophobes lorsque cela est possible</p>		
Illustrations	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>Hopkalite 200 mg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Tube Perkin-Elmer</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Charbon actif 400/200 mg</p> </div> </div>		

Type de prélèvement	Échantillonnage actif sur filtre imprégné avec pompage
Paramètres de prélèvements et gamme de concentrations	Gamme de concentrations : 1 µg/m ³ à 1 000 mg/m ³ selon l'adsorbant et la méthode d'analyse Durée de prélèvement comprise entre 15 min et 24h (en fonction des LQ recherchées et des caractéristiques du milieu) Débits de prélèvement : 0,5 à 2 L/min (respecter le débit recommandé dans les méthodes de référence)
Exemples de composés concernés	Analyse quantitative de composés spécifiques à la solution d'imprégnation (métaux et métalloïdes, cyanures, ammoniac, sels d'ammonium, HAP...)
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Méthode sélective pour des composés spécifiques - Permet de prélever des volumes d'air importants - Mise en œuvre simple. Toutefois, il convient de respecter les procédures pour la mise en œuvre de la chaîne de prélèvement et les étapes amont (saturation, choix LD/LQ...)
Inconvénients / limites	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite un contrôle rigoureux du débit - Nécessite la sorption et la désorption des composés, avec des rendements d'extraction fonction des composés et des supports de prélèvement - Certains réactifs ont des durées de conservation assez courtes - Interférence possible de l'humidité - Le risque de saturation doit être évalué et si nécessaire les volumes prélevés doivent être adaptés - Le bruit engendré par la pompe peut être gênant en fonction des lieux de prélèvement (ex : chambre)
Conclusion	Méthode sélective, simple à mettre en œuvre permettant le prélèvement d'un volume d'air important
Illustration	<div style="text-align: center;">  <p>Filtres à quartz (SKC)</p> </div>

Type de prélèvement	Échantillonnage actif par barboteur
Paramètres de prélèvements et gamme de concentrations	Gamme de concentrations : 1 µg/m ³ à 1 000 mg/m ³ Durée de prélèvement comprise entre 15 min et 24h (en fonction des LQ recherchées, des caractéristiques du milieu et des caractéristiques du barboteur) Débits : 0,5 à 1 L/min (respecter le débit recommandé dans les méthodes de référence)
Exemples de composés concernés	Analyse quantitative de composés spécifiques à la solution d'imprégnation : aldéhydes, cyanure d'hydrogène, phénol...
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Mise en œuvre simple - Méthode sélective pour des composés spécifiques
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Les particules peuvent être prélevées, suivant le débit de prélèvement et le milieu prélevé (notamment air intérieur, air des sous-sols...) - Nécessite la sorption et la désorption des composés, avec des rendements d'extraction fonction des composés et des supports de prélèvement - Certaines solutions ont des durées de conservation assez courtes - Le risque de saturation de la solution doit être évalué et si nécessaire les volumes prélevés doivent être adaptés
Conclusion	Méthode sélective adaptée pour des composés ou mélanges de composés bien identifiés
Illustrations	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>Barboteur</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>/ Prélèvement d'air sous dalle avec barboteur en verre</p> </div> </div>

Type de prélèvement	Échantillonnage actif dans conteneurs en dépression (canister)
Paramètres de prélèvements et gamme de concentrations	Gamme de concentrations : 0,1 µg/m ³ à 1 000 mg/m ³ (et jusqu'à 1 g/m ³) Durée de prélèvement comprise entre 15 min et 24h (débit réglable via un détendeur adapté) Volumes de conteneurs en dépression disponibles : 1 L, 2,7 L, 3,2 L, 6 L, 15 L
Exemples de composés concernés	Analyse quantitative d'une large gamme de composés volatils ou semi volatils : HCT (coupes TPH, HAP (essentiellement le naphthalène), BTEX, COHV, chlorobenzènes, cétones
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Mise en œuvre très simple - Bruit faible laissant la possibilité de positionner le conteneur dans une pièce de vie (chambre par exemple) - Minimisation des interférences liées au contrôle des débits, aux compétitions de substances lors de l'adsorption - Prélèvement direct de l'air
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Faible volume d'air prélevé (quelques litres) - Nécessite la mise en place d'un détendeur pour contrôler le débit de prélèvement - Nécessite un nettoyage rigoureux avant réutilisation - Phénomène de microgouttelettes sur les parois susceptibles d'influencer les résultats d'analyse - Actuellement, seuls quelques laboratoires français fournissent et analysent ce type de matériel sinon cela nécessite de traiter avec des laboratoires étrangers qui assureront la fourniture et l'analyse
Conclusion	Méthode simple à mettre en œuvre, avec peu d'interférences, permet avec un seul système de prélèvement d'analyser de nombreuses substances (avec les LD/LQ très basses)
Illustration	<div style="text-align: center;">  <p>Summa canister[®] (AirToxic)</p> </div>

Type de prélèvement	Échantillonnage actif en sac d'échantillonnage	
Paramètres de prélèvements et gamme de concentrations	Gamme de concentrations : 0,1 à 1 000 µg/m ³ Durée de prélèvement comprise entre 15 min et 24h (en fonction des LQ recherchées et des caractéristiques du milieu)	
Exemples de composés concernés	Large gamme de composés volatils ou semi volatils (en fonction du type de sac utilisé), dioxyde de soufre...	
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Prélèvement direct de l'air - Minimisation des interférences liées au contrôle des débits, aux compétitions de substances lors de l'adsorption 	
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Faible volume prélevé - Nécessite d'enlever la matière particulaire en suspension dans l'air à l'aide d'un filtre en acier inoxydable (pas nécessaire pour l'air intérieur) - Phénomène de microgouttelettes sur les parois susceptibles d'influencer les résultats d'analyse - Durées de conservation parfois très courtes pour certains composés d'après les méthodes de référence (ex : moins de 4h pour le benzène selon la méthode NIOSH 3700) 	
Conclusion	Méthode permettant un prélèvement direct de l'air, mais avec un faible volume Cette méthode est peu utilisée en France et généralement réservée à des composés spécifiques	
Illustrations	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center;">  <p>septum</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">Sac de prélèvement en polymères Tedlar / Sac de prélèvement en aluminium</p>	

Type de prélèvement	Synthèse des échantillonneurs passifs testés dans le cadre des projets en cours (2015)																																					
Paramètres de prélèvements et gamme de concentrations	<p>Gamme de concentrations / teneurs : Les gammes de concentrations ou de teneurs atteignables sont à valider au cas par cas avec les laboratoires et sont fonction du type de support.</p> <p>Durée de prélèvement : la détermination des durées d'exposition des supports passifs sera réalisée en concertation avec le laboratoire et en considérant les composés recherchés, les gammes de concentrations attendues, la nature et les conditions des sols, les conditions météorologiques attendues...</p>																																					
Exemple de composés concernés	Large gamme de composés volatils ou semi volatils. Le détail des composés est à valider au cas par cas avec les laboratoires et selon le type de support.																																					
Synthèse et illustrations	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="6" style="background-color: #e6f2e6;">Résultats en masse</th> </tr> <tr> <th colspan="6" style="background-color: #e6f2e6;">Résultats en concentration</th> </tr> <tr> <th style="background-color: #ffff00;">Matrice échantillonnée</th> <th style="background-color: #d9e1f2;">Air intérieur et extérieur</th> <th style="background-color: #d9e1f2;">Air intérieur et extérieur</th> <th style="background-color: #d9e1f2;">Air intérieur et extérieur</th> <th style="background-color: #d9e1f2;">Air intérieur et extérieur</th> <th style="background-color: #d9e1f2;">Air intérieur et extérieur</th> </tr> <tr> <th></th> <th style="background-color: #ffe0b2;">Gaz du sol</th> <th style="background-color: #ffe0b2;">Gaz du sol</th> <th style="background-color: #ffe0b2;">Gaz du sol</th> <th style="background-color: #ffe0b2;">Gaz du sol</th> <th style="background-color: #ffe0b2;">(Gaz du sol)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>  BeSure® Sampler (vial avec capuchon grillagé et avec adsorbants brevetés) </td> <td>  SPG-0008 (membrane GoreTex® et adsorbants brevetés) TIPS, en développement (membrane GoreTex® et adsorbants brevetés) </td> <td>  tube en inox avec adsorbant Chromosorb 106, sans tête de diffusion </td> <td>  tube en inox avec adsorbant Radiello®145, avec tête de diffusion </td> <td>  corps diffusif avec adsorbant Radiello® 145 </td> </tr> <tr> <td></td> <td style="background-color: #f2f2f2;">Constructeur/ Fournisseurs/ Analyses</td> <td style="background-color: #f2f2f2;">BEACON Environnemental Service (USA)</td> <td style="background-color: #f2f2f2;">Amplifeid Geochemical Imaging - AGI (USA)</td> <td style="background-color: #f2f2f2;">BEACON Environnemental Service (USA)</td> <td style="background-color: #f2f2f2;">conditionnement d'un tube Perkin Elmer et d'un l'adsorbant Radiello® (INERIS, développement interne)</td> <td style="background-color: #f2f2f2;">Radiello®, représentants de la marque et laboratoires</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">(Source : ADEME 2016)</p>	Résultats en masse						Résultats en concentration						Matrice échantillonnée	Air intérieur et extérieur	Air intérieur et extérieur	Air intérieur et extérieur	Air intérieur et extérieur	Air intérieur et extérieur		Gaz du sol	Gaz du sol	Gaz du sol	Gaz du sol	(Gaz du sol)		 BeSure® Sampler (vial avec capuchon grillagé et avec adsorbants brevetés)	 SPG-0008 (membrane GoreTex® et adsorbants brevetés) TIPS , en développement (membrane GoreTex® et adsorbants brevetés)	 tube en inox avec adsorbant Chromosorb 106, sans tête de diffusion	 tube en inox avec adsorbant Radiello®145, avec tête de diffusion	 corps diffusif avec adsorbant Radiello® 145		Constructeur/ Fournisseurs/ Analyses	BEACON Environnemental Service (USA)	Amplifeid Geochemical Imaging - AGI (USA)	BEACON Environnemental Service (USA)	conditionnement d'un tube Perkin Elmer et d'un l'adsorbant Radiello® (INERIS, développement interne)	Radiello® , représentants de la marque et laboratoires
Résultats en masse																																						
Résultats en concentration																																						
Matrice échantillonnée	Air intérieur et extérieur	Air intérieur et extérieur	Air intérieur et extérieur	Air intérieur et extérieur	Air intérieur et extérieur																																	
	Gaz du sol	Gaz du sol	Gaz du sol	Gaz du sol	(Gaz du sol)																																	
	 BeSure® Sampler (vial avec capuchon grillagé et avec adsorbants brevetés)	 SPG-0008 (membrane GoreTex® et adsorbants brevetés) TIPS , en développement (membrane GoreTex® et adsorbants brevetés)	 tube en inox avec adsorbant Chromosorb 106, sans tête de diffusion	 tube en inox avec adsorbant Radiello®145, avec tête de diffusion	 corps diffusif avec adsorbant Radiello® 145																																	
	Constructeur/ Fournisseurs/ Analyses	BEACON Environnemental Service (USA)	Amplifeid Geochemical Imaging - AGI (USA)	BEACON Environnemental Service (USA)	conditionnement d'un tube Perkin Elmer et d'un l'adsorbant Radiello® (INERIS, développement interne)	Radiello® , représentants de la marque et laboratoires																																
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Mise en œuvre facile ne nécessitant pas d'énergie, absence de bruit. - Pour l'air intérieur : couramment mis en œuvre et éprouvé pour certaines gammes de concentrations et durées d'exposition - Pour les gaz du sol : <ul style="list-style-type: none"> • intéressants en présence de sols peu perméables, • intéressants pour la réalisation d'études de screening, • absence de contrainte liée à l'humidité pour certains (à valider au cas par cas auprès des fabricants) : présence d'une membrane poreuse ou d'adsorbant hydrophobes 																																					

Type de prélèvement	Synthèse des échantillonneurs passifs testés dans le cadre des projets en cours (2015) Suite
Inconvénients	<p>– Pour certains (à valider au cas par cas auprès des fabricants) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • fournitures et analyses à l'étranger uniquement, • faible retour d'expérience pour les longs temps d'exposition en présence de fortes concentrations. • nécessité de mesurer / déterminer des paramètres du sol pour l'étape de calculs en concentrations depuis les masses : lithologie, porosité totale, porosité à l'air, humidité, température, conditions météorologiques, etc... • faible retour d'expérience pour l'utilisation dans des piézaires ou des ouvrages temporaires pour la conversion des masses adsorbées en concentrations.
Conclusion	<p>Les échantillonneurs passifs sont simples à mettre en œuvre.</p> <p>Pour l'air intérieur / extérieur, les échantillonneurs passifs sont globalement adaptés et éprouvés.</p> <p>Pour les gaz du sol, la poursuite de travaux de R & D est nécessaire pour appréhender les performances en terme de quantification des concentrations mais ils sont adaptés pour la réalisation d'études de screening (piézaires, ouvrages temporaires, échantillonneurs passifs mis en place dans le sol).</p>

Annexe 11

**Recommandations du groupe de travail laboratoires
sur les supports de prélèvement et méthodes
d'analyses adaptés aux principaux composés
volatils**

Famille de polluants	Supports de prélèvement recommandés pour les gaz du sol et l'air intérieur / extérieur	Supports de prélèvement déconseillés pour les gaz du sol mais retenus pour l'air intérieur / extérieur	Supports de prélèvement déconseillés pour tous les milieux	Remarques du GT
Alcools	Anasorb 747 Canister (1 à 6 l) Carbotrap 349 Charbon actif Supports à désorption thermique	Gel de silice	-	Le gel de silice a été écarté pour les gaz du sol en raison de sa forte affinité avec l'humidité et de l'existence de supports et méthodes alternatifs
Aldéhydes	Barboteur (bisulfite de sodium à 1 %) Gel de silice imprégné de DNPH XAD-2 dopé au 2-(hydroxyméthyl) pipéridine Gel de silice imprégné de DNPH	-	Canister (1 à 6 l)	Le canister n'est pas le « support » le plus adapté en raison de la forte réactivité de ce composé qui nécessiterait de réaliser l'analyse immédiatement après le prélèvement.
Ammoniac	Anasorb 747 imprégné de H ₂ SO ₄ Barboteur (H ₂ SO ₄ à 0,05 M) Filtre en fibre de quartz imprégné de H ₂ SO ₄	-	Canister (1 à 6 l)	Le canister n'est pas le « support » le plus adapté en raison de la forte réactivité de ce composé qui nécessiterait de réaliser l'analyse immédiatement après le prélèvement.
Anilines	Canister (1 à 6 l) Carbotrap 349 Tenax TA XAD-7 imprégné H ₃ PO ₄	Gel de silice	-	Le gel de silice a été écarté pour les gaz du sol en raison de sa forte affinité avec l'humidité et de l'existence de supports et méthodes alternatifs
Benzènes et dérivés	Anasorb 747 Canister (1 à 6 l) Carbotrap 349 Charbon actif Tenax TA XAD-4 Supports à désorption thermique	-	Sac Tedlar	Temps de conservation trop court pour le sac Tedlar (4 heures selon NIOSH 3700)
Cétones	Canister (1 à 6 l) Charbon actif Tenax TA Carbosieve S-III Supports à désorption thermique	gel de silice	-	Le gel de silice a été écarté pour les gaz du sol en raison de sa forte affinité avec l'humidité et de l'existence de supports et méthodes alternatifs
Chlorobenzènes (mono et di)	Canister (1 à 6 l) Carbotrap 349 Charbon actif Supports à désorption thermique	-	XAD-2	XAD-2 est plus pertinent pour les tri- et tétra- que pour le mono- et le di-chlorobenzènes.

Famille de polluants	Supports de prélèvement recommandés pour les gaz du sol et l'air intérieur / extérieur	Supports de prélèvement déconseillés pour les gaz du sol mais retenus pour l'air intérieur / extérieur	Supports de prélèvement déconseillés pour tous les milieux	Remarques du GT
Chlorobenzènes (tri, tétra et penta)	Filtre PTFE & XAD-2	-	-	-
COHV aliphatiques (hors CV)	Charbon actif Canister (1 à 6 l) Carbosieve S-III Carbotrap 349 Tenax TA XAD-4 Supports à désorption thermique	-	-	-
Chlorure de vinyle	Canister Carbosieve S-III Charbon actif : - 2 TCA 400/200 mg en série, ou - 1 TCA 900/300 mg, ou - 1 TCA 800/400 mg) Supports à désorption thermique	-	TCA 100/50 mg	L'analyse du chlorure de vinyle sur charbon actif 100/50 mg est déconseillée en raison de la forte mobilité de ce composé et de la faible masse des tubes 100/50 mg. Il est recommandé d'analyser ce composé : - soit sur 2 TCA 400/200 mg placés en série (pour évaluer la migration de ce composé sur le 2 nd tube) - soit sur 1 TCA 800/400 mg ou 1 TCA 900/300 mg contenant des masses d'adsorbant suffisantes pour limiter la migration de ce composé. Remarque : lors d'analyse du chlorure de vinyle en même temps que les autres COHV. Seule l'analyse du chlorure de vinyle est recommandée sur le 2 nd tube TCA 400/200 mg.
Cyanure d'hydrogène	Barboteur : (NaOH.ou KOH) Filtre en cellulose imprégné NaOH Soda lime	-	-	-
Disulfure de carbone (CS ₂)	Canister (1 à 6 l) Carboxen 1000 Charbon actif Supports à désorption thermique	-	-	-

Famille de polluants	Supports de prélèvement recommandés pour les gaz du sol et l'air intérieur / extérieur	Supports de prélèvement déconseillés pour les gaz du sol mais retenus pour l'air intérieur / extérieur	Supports de prélèvement déconseillés pour tous les milieux	Remarques du GT
Disulfure d'hydrogène (H ₂ S)	filtres en fibre de quartz imprégnés d'acétate de cadmium Canister (1 à 6 l) Charbon actif	-	Filtre imprégné AgNO ₃	Support associé à une méthode jugée moins pertinente
Ethers (MTBE, ETBE, DIPE)	Canister (1 à 6 l) Charbon actif Supports à désorption thermique	-	-	-
HAP (Naphtalène)	Canister (1 à 6 l) Carbotrap 349 Chromosorb 106 Charbon actif Supports à désorption thermique	-	XAD-2	XAD2 adapté pour des HAP plus lourds que le naphtalène
Hydrocarbures C5-C16 (aromatiques et aliphatiques)	Canister (1 à 6 l) Charbon actif support à désorption thermique	-	-	Utilisation possible de la méthode TPH WG sur ces supports.
Mercure minéral	Hopcalite Barboteur (KMnO ₄ + H ₂ SO ₄ ou K ₂ Cr ₂ O ₇ + HNO ₃)	-	Charbon actif	Le charbon actif est écarté car l'Hopcalite est plus spécifique au mercure minéral et est plus pertinent.
Nitrobenzène	Canister (1 à 6 l) Carbotrap 349 XAD-7 (60/30 mg) Supports à désorption thermique	Gel de silice	-	Le gel de silice a été écarté pour les gaz du sol en raison de sa forte affinité avec l'humidité et de l'existence de supports et méthodes alternatifs
Nitrotoluènes	Tenax	-	-	-
Phénols	Barboteur (NaOH à 0.1N) Canister (1 à 6 l) Carbotrap 349 XAD-2 XAD-7 Supports à désorption thermique	Gel de silice	-	Le gel de silice a été écarté pour les gaz du sol en raison de sa forte affinité avec l'humidité et de l'existence de supports et méthodes alternatifs

Annexe 12

**Valeurs guides françaises de qualité d'air intérieur
(ANSES) et Valeurs repères d'aide à la gestion (HCSP)**

Polluant	ANSES					HCSP				
	Année de parution	VGAI court terme (1 à 14 jours)	VGAI intermédiaire (14 jours à 1 an)	VGAI long terme		Année de parution	Valeur d'action rapide	Valeur d'information et de recommandations	Valeur repère	Valeur cible
				Effets non cancérogènes (>1 an)	Effets cancérogènes					
Formaldéhyde	2007	50 µg/m ³ pour une exposition de 2 h		10 µg/m ³		2009	100 µg/m ³	50 µg/m ³	30 µg/m ³	10 µg/m ³
Benzène	2008	30 µg/m ³	20 µg/m ³	10 µg/m ³	0,2 µg/m ³ – niveau de risque de 10 ⁻⁶ 2 µg/m ³ – niveau de risque de 10 ⁻⁵	2010	10 µg/m ³		5 µg/m ³	2 µg/m ³
Monoxyde de carbone	2007	- 10 mg/m ³ (exposition de 8 h) - 30 mg/m ³ (exposition d'1 h) - 60 mg/m ³ (exposition de 30 min) - 100 mg/m ³ (exposition de 15 min)								
Naphtalène	2009			10 µg/m ³		2012	50 µg/m ³		10 µg/m ³	
Trichloroéthylène	2009 et 2011	800 µg/m ³		2,3 µg/m ³ – niveau de risque de 10 ⁻⁶ 23 µg/m ³ – niveau de risque de 10 ⁻⁵		2012	10 µg/m ³		2 µg/m ³	
Tétrachloroéthylène	2010	1 380 µg/m ³		250 µg/m ³		2010	1 250 µg/m ³		250 µg/m ³	
Dioxyde d'azote	2013	200 µg/m ³ pour une exposition d'1 h		20 µg/m ³						
Acroléine	2013	6,9 µg/m ³ pour une exposition d'1 h		0,8 µg/m ³						
Acétaldéhyde	2014	3 000 µg/m ³ pour une exposition d'1 h		160 µg/m ³						

Valeurs guides françaises de qualité d'air intérieur (ANSES) et Valeurs repères d'aide à la gestion (HCSP)

Annexe 13

Qualité – Vérifications et approbations du guide

Document public

Gestion des sites et sols pollués Guide pratique pour la caractérisation des gaz du sol et de l'air intérieur en lien avec une pollution des sols et/ou des eaux souterraines

Rapport final

BRGM/RP-65870-FR

Novembre 2016

Nicolas AUBERT, BRGM
Laurence LETHIELLEUX, INERIS

Vérificateur :

Nom : H. Leprond

Fonction : Responsable d'unité
D3E/3SP

Date : 04/11/2016

Signature :



Approbateur :

Nom : Rouvreau Laurent

Fonction : Direction Développement

Date : 10/11/2016

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Gestion des sites et sols pollués

Guide pratique pour la caractérisation des gaz du sol et de l'air intérieur en lien avec une pollution des sols et/ou des eaux souterraines

Réf. INERIS : DRC-16-156183-01401A

Novembre 2016 - Rapport final

Co-rédacteur : Nicolas AUBERT – BRGM

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Laurence LETHIELLEUX	Nathalie VELLY	Martine RAMEL
Qualité	Ingénieur de l'unité Impact SANitaire et Expositions	Responsable de l'unité Impact SANitaire et Expositions	Responsable du Pôle Risque et Technologies Durables
Visa	