

TEMPAIR - PARTIE 2

EVALUATION DES ECHANTILLONNEURS PASSIFS POUR LE PCE DANS LES GAZ DU SOL

Mars 2017

Projet R&D co-financé par l'ADEME (Convention n°1472C0017)

Corinne HULOT, Fabrice RICHEZ (INERIS)

Sylvie TRAVERSE, Thomas GLEIZE (BURGEAP)



Coordination technique : Yves DUCLOS, Service Friches Urbaines et Sites Pollués – SFUSP –
Direction Villes et Territoires Durables – ADEME Angers



REMERCIEMENTS

Les partenaires remercient l'ADEME pour le cofinancement apporté au projet ainsi que le propriétaire du site atelier pour sa mise à disposition durant la période du projet.

Citation de ce rapport :

Hulot C. (INERIS), Traverse S. (BURGEAP), Richez F. (INERIS), Gleize T. (BURGEAP), 2017. Projet TEMPAIR – partie 2. Evaluation des échantillonneurs passifs pour le PCE dans les gaz du sol. Mars 2017

En ce qui concerne l'INERIS, ce rapport est référencé INERIS-DRC-17-146573-04100A. Il a été rédigé par Madame Corinne Hulot, vérifié par Madame Nathalie Velly et approuvé par Madame Martine Ramel.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Any representation or reproduction of the contents herein, in whole or in part, without the consent of the author(s) or their assignees or successors, is illicit under the French Intellectual Property Code (article L 122-4) and constitutes an infringement of copyright subject to penal sanctions. Authorised copying (article 122-5) is restricted to copies or reproductions for private use by the copier alone, excluding collective or group use, and to short citations and analyses integrated into works of a critical, pedagogical or informational nature, subject to compliance with the stipulations of articles L 122-10 – L 122-12 incl. of the Intellectual Property Code as regards reproduction by reprographic means.

AVANT-PROPOS

En présence de composés organiques volatils (COV) dans les sols ou les eaux souterraines, leur transfert vers les gaz du sol et les concentrations induites dans l'air intérieur constituent une part significative de l'impact du passif environnemental d'un site pollué.

En France, la gestion des sites et sols pollués repose sur le principe de gestion suivant l'usage, et se décline par les documents méthodologiques de février 2007 (version révisée à paraître) et les prestations encadrées par la norme NF X 31-620 (version révisée à paraître). Parallèlement, depuis peu, il est demandé dans les permis de construire la réalisation d'une attestation de prise en compte des mesures de gestion dans le projet par un bureau d'étude certifié dans le domaine des sites et sols pollués (articles L556-1 et 556-2 du code de l'environnement).

L'établissement des mesures de gestion nécessite une bonne appréhension des concentrations en polluants volatils dans les gaz du sol présentes ou futures sous un aménagement bâti. Des recommandations sont formulées dans la norme ISO 18400-204 (à paraître) et dans les guides FLUXOBAT (Traverse et al., 2013) et BRGM-INERIS (2016) pour le dimensionnement, la mise en œuvre et l'interprétation des mesures de concentrations dans les gaz du sol et dans l'air intérieur. Toutefois, il demeure pour les prestataires non seulement des difficultés à faire le lien entre les facteurs de variabilité temporelle et les variations de concentration tant dans les gaz du sol que dans l'air, et des questionnements sur l'intérêt et les limites à l'utilisation de certains outils de prélèvement des polluants.

Les objectifs du projet TEMPAIR (2014-2016) s'articulent autour de trois questionnements concernant la caractérisation des concentrations dans les gaz du sol et dans l'air intérieur :

- Partie 1 : la variabilité temporelle des concentrations dans les gaz du sol et dans l'air intérieur,
- Partie 2 : l'évaluation des échantillonneurs passifs dans les gaz du sol,
- Partie 3 : l'intérêt de l'usage de filtres anti-humidité et l'influence de la purge préalable pour le prélèvement de polluants dans les gaz du sol.

Le présent document traite de la partie 2, les deux autres parties font l'objet de documents spécifiques référencés Traverse et al. (2017a) et Traverse et al. (2017b).

Le projet TEMPAIR a fait intervenir BURGEAP sur l'analyse de la variabilité des concentrations dans les gaz du sol et dans l'air intérieur ainsi que sur l'influence des filtres anti-humidité sur les concentrations mesurées, et l'INERIS sur la mise en œuvre des échantillonneurs passifs dans les gaz du sol. Le projet repose sur des mesures et des modélisations conduites sur un site atelier présentant une pollution en tétrachloroéthylène et dans une moindre mesure en trichloroéthylène dont la source est constituée de phase organique dans les zones non saturée et saturée.

SOMMAIRE

Avant-propos	3
Résumé	7
Abstract	9
Synthèse	11
1. Contexte général, problématique, objectifs et moyens	22
1.1 Contexte général	22
1.2 Etat de l'art et problématique	22
1.3 Objectifs	25
1.4 Moyens déployés	25
1.4.1 Site atelier	25
1.4.1.1 Contexte environnemental	25
1.4.1.2 Réseau de points de mesure	26
1.4.2 Campagnes de mesures	28
1.4.3 Echantillonneurs passifs utilisés	28
2. Revue de la littérature	30
2.1 Pratiques actuelles	30
2.2 Caractéristiques générales des échantillonneurs passifs	31
2.3 Fonctionnement général des échantillonneurs passifs basé sur la diffusion	34
2.4 Facteurs d'influence sur le taux d'échantillonnage dans l'air	35
2.5 Expression des résultats en masse et conversion en concentration	36
2.6 Description des échantillonneurs passifs mis en œuvre pour les gaz du sol	40
2.6.1 Description des échantillonneurs passifs pour les gaz du sol	40
2.6.1.1 L'échantillonneur passif BeSure® Sampler commercialisé par l'entreprise BEACON Environmental Services Inc.	40
2.6.1.2 L'échantillonneur passif SPG-0008 (commercialisé) de l'entreprise Amplified Geochemical Imaging LLC (AGI)	41
2.6.1.3 L'échantillonneur passif TIPS (en cours de développement) de l'entreprise Amplified Geochemical Imaging LLC (AGI)	44
2.6.1.4 L'échantillonneur passif de BEACON Environmental Services, composé d'un tube en acier avec adsorbant et sans tête de diffusion (proposée depuis l'été 2016)	44
2.6.1.5 L'échantillonneur passif conditionné par l'INERIS (un développement interne), composé d'un tube en acier avec un adsorbant de type « Radiello® 145 » et une tête de diffusion	45
2.6.1.6 Autres échantillonneurs passifs	45
2.7 Synthèse des caractéristiques des échantillonneurs passifs	46
2.8 Etudes d'intercomparaison d'échantillonneurs passifs	48
3. Expérimentations	49
3.1 Plan d'échantillonnage	49
3.2 Mise en œuvre des prélèvements pour les gaz du sol dans des trous de sondage non équipés et dans des piézaires	51
3.3 Protocoles analytiques	53
3.4 Résultats de caractérisation des gaz du sol dans des trous de sondage non équipés	53
3.4.1 Résultats en masse	53
3.4.2 Résultats en concentration	56
3.4.2.1 Préambule	56
3.4.2.2 Résultats	56
3.4.3 Conclusions	59
3.5 Résultats de caractérisation des gaz du sol dans les piézaires	60
3.5.1 Préambule	60
3.5.2 Résultats en concentration	60
3.5.2.1 Impact de la connaissance des valeurs des paramètres spécifiques du sol pour le calcul des concentrations pour les EP de AGI	60
3.5.2.2 Comportements des EP en fonction des gammes de concentrations	62
3.5.2.3 Comportements des EP en termes de durées d'exposition	67
3.5.3 Conclusions	68

3.6	Apports des mesures réalisées dans l'air (adsorption mieux maîtrisée) sur l'expression des résultats en concentrations des gaz du sol	70
3.7	Apports des mesures réalisées dans le cadre du projet PassSolAir	70
4.	Enseignements généraux pour une utilisation appropriée des échantillonneurs passifs	72
4.1	Sélection de l'échantillonneur passif	72
4.2	Avantages généraux des échantillonneurs passifs pour les gaz du sol	72
4.3	Limites générales des échantillonneurs passifs pour les gaz du sol	73
5.	Conclusions et perspectives	74
6.	Références consultées	78

Annexes

Annexe 1.	Illustrations de la mise en place du « EP BeSure Sampler - BEACON » et du « EP SPG-0008 - AGI » pour les gaz du sol, extraites de références des fabricants	81
Annexe 2.	Autre Echantillonneur passif	85
Annexe 3.	Synthèse des résultats associés aux tests en chambre à atmosphère contrôlée dans le cadre du projet PassSolAir	87
Annexe 4.	Evaluation des échantillonneurs passifs dans l'air intérieur et extérieur dans le cadre du projet TEMPAIR	91

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Echantillonneurs utilisés pour les gaz du sol	14
Tableau 2 - Synthèse des mesures en termes de gammes de concentration dans les gaz du sol dans les piézairs.....	17
Tableau 3 - Echantillonneurs passifs utilisés pour les gaz du sol (et l'air)	29
Tableau 4 - Synthèse des caractéristiques des échantillonneurs passifs pour les gaz du sol	47
Tableau 5 - Synthèse du plan d'échantillonnage des campagnes avec les EP	51
Tableau 6 - Méthodes analytiques et incertitudes analytiques des résultats pour le PCE	53
Tableau 7 - Synthèse des mesures en termes de gammes de concentration dans les gaz du sol dans les trous de sondage non équipés	59
Tableau 8 - Synthèse des mesures en termes de gammes de concentration dans les gaz du sol dans les piézairs.....	66
Tableau 9 - Synthèse des mesures en termes de gammes de concentration en PCE issues des tests en chambre à atmosphère contrôlée du projet PassSolAir	71

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Cartographie en masse (μg) du PCE dans les gaz du sol des trous de sondage de subsurface non équipés et obturés par un bouchon étanche et des piézairs pour les « EP BeSure Sampler - BEACON », « EP SPG-0008 - AGI » et « EP TIPS - AGI » pour les campagnes de nov.-déc. 2014 et août 2015.....	15
Figure 2 - Le site atelier	26
Figure 3 - Localisation des piézairs (pza) avec leurs caractéristiques et des trous de sondage non équipés et obturés par un bouchon étanche (SC) dans lesquels les prélèvements ont été réalisés	27
Figure 4 - Comparaison de l'effet de l'humidité relative sur l'adsorbant de l'échantillonneur SPG-0008 proposé par AGI et un adsorbant carboné (source AGI)	32
Figure 5 - Effet de l'humidité relative sur l'adsorbant de l'échantillonneur SPG-0008 proposé par AGI pour le toluène (source AGI)	32
Figure 6 - Schémas de principe des échantillonneurs à géométrie radiale et axiale (source INERIS)	33
Figure 7 - Matrice pour les échantillonneurs passifs (d'après NAVFAC, 2016 : source : adapté de l'EPA, 2016)	34
Figure 8 - Echantillonneurs passifs intégratifs et régime cinétique (source : INERIS).....	34
Figure 9 - Concentration moyenne des composés pendant la durée d'exposition (source : INERIS)	35
Figure 10 - Variation du facteur E « Soil Effectiveness - facteur d'influence du sol » (source AGI)	39
Figure 11 - Exemples de courbes d'adsorption (AGI, 2015)	43
Figure 12 - Illustration de la mise en œuvre des échantillonneurs passifs dans des piézairs	52
Figure 13 - Illustration de la mise en œuvre des échantillonneurs passifs dans les trous de sondage non équipés.....	52
Figure 14 - Cartographie en masse (μg) du PCE dans les gaz du sol des trous de sondage de subsurface non équipés et obturés par un bouchon étanche et des piézairs pour les « EP BeSure Sampler - BEACON », « EP SPG-0008 – AGI » et « TIPS - AGI » pour les campagnes de nov.-déc. 2014 et août 2015.....	55
Figure 15 - Résultats en concentration dans les gaz du sol des trous de sondage non équipés et des piézairs de la zone des garages.....	57
Figure 16 - Résultats en concentration dans les gaz du sol des trous de sondage non équipés de la zone du jardin du site	58
Figure 17 - Comparaison des concentrations calculées avec les valeurs des paramètres du sol issues de la littérature et ceux spécifiques au site, pour l'EP SPG-0008 et TIPS de AGI.....	61
Figure 18 - Comparaison des concentrations observées pour les échantillonneurs passifs et actifs en début et fin de prélèvement passifs dans les piézairs au droit du site pilote	63
Figure 19 - Comparaison des concentrations observées pour les échantillonneurs passifs, et actifs en début et fin de prélèvements passifs, dans les piézairs au droit de la zone des garages	63
Figure 20 - Comparaison des concentrations observées en Pza12 pour trois durées successives de prélèvement pour les échantillonneurs passifs, et actifs en début et fin de prélèvements passifs.....	67

RESUME

L'évaluation de l'état de pollution du milieu souterrain, des mécanismes de transfert et des impacts de composés organiques volatils dans l'air à l'intérieur des bâtiments est réalisée au travers des diagnostics portant en premier lieu sur les concentrations dans les sols, la nappe et les gaz du sol comme milieu intégrateur. En présence de bâtiments, qu'ils soient situés au droit d'une source de pollution ou dans le panache de pollution, l'estimation des concentrations d'exposition repose sur des diagnostics dans l'air intérieur. Des recommandations sont formulées dans différents guides pour le dimensionnement, la mise en œuvre et l'interprétation des mesures de concentrations. Toutefois, des questionnements subsistent sur l'intérêt et les limites à l'utilisation de certains outils pour le prélèvement des polluants dans les gaz du sol et sur la variabilité temporelle et spatiale des concentrations tant dans les gaz du sol que dans l'air intérieur.

Les livrables publics du projet de recherche TEMPAIR (2014-2016), réalisé par BURGEAP et l'INERIS, sont séparés en trois parties traitant de sujets distincts. La partie 1 référencée Traverse et al. (2017a) traite de la variabilité temporelle des concentrations dans les gaz du sol et dans l'air intérieur. La partie 2, constituée du présent document, traite de l'utilisation des échantillonneurs passifs pour les gaz du sol. La partie 3, référencée Traverse et al. (2017b), traite de l'utilisation de filtres anti-humidité et de la purge préalable pour l'échantillonnage dans les gaz du sol de pollutions volatiles par du tétrachloroéthylène (PCE) et du trichloroéthylène (TCE).

La littérature et les guides traitant de la mesure des masses et des concentrations dans les gaz du sol et l'air intérieur (FLUXOBAT (Traverse et al. 2013), ATTENA (ADEME, 2013), CityChlor (ADEME, 2013), BRGM/INERIS (2016), etc.) mettent en exergue la forte variabilité temporelle des concentrations dans ces milieux. De ce fait, la mise en œuvre de prélèvements au moyen d'échantillonneurs passifs (EP) permet l'acquisition de concentrations moyennes sur de longues durées (d'une à plusieurs semaines), intégrant les variations non observées lors de mesures ponctuelles de courtes durées (prélèvements dynamiques ou par aspiration naturelle). L'utilisation d'EP apparaît plus appropriée aux objectifs techniques et scientifiques de certaines études (par exemple l'évaluation de l'exposition des populations, le dimensionnement de travaux de dépollution, la surveillance de l'évolution de l'état des milieux, etc.).

Le projet repose sur l'évaluation des performances de 5 échantillonneurs passifs pour la caractérisation des gaz du sol. Ces EP ont été mis en œuvre au cours de plusieurs campagnes de mesure au sein de 7 ouvrages permanents (piézaires) captant différents horizons lithologiques et de 5 trous de sondage de sub-surface non équipés (obturés par un bouchon étanche) couvrant 3 différentes zones du site atelier, présentant des gammes de concentrations en PCE différentes, de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à plusieurs centaines de mg/m^3 .

Les EP mis en œuvre durant des durées d'exposition de 1 à 7 jours sont :

- le BeSure® Sampler commercialisé par l'entreprise BEACON Environmental Services Inc. (dénommé dans ce rapport « *EP BeSure Sampler - BEACON* »),
- le SPG-0008 commercialisé par l'entreprise américaine Amplified Geochemical Imaging, LLC (AGI) (dénommé dans ce rapport « *EP SPG-0008 - AGI* »),
- le TIPS, en cours de développement par l'entreprise américaine Amplified Geochemical Imaging, LLC (AGI) (dénommé dans ce rapport « *EP TIPS - AGI* »),
- le tube en acier inox avec adsorbant chromosorb 106 (avec une tête de diffusion depuis fin août 2015) commercialisé par l'entreprise américaine BEACON Environmental Services Inc. (dénommé dans ce rapport « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* »),
- le tube en acier inox avec un adsorbant Radiello 145 et avec une tête de diffusion conditionné par l'INERIS, un développement interne INERIS (dénommé dans ce rapport « *EP tube avec Radiello 145* »).

Les moyens déployés reposent sur la réalisation de prélèvements à l'aide de plusieurs échantillonneurs passifs et par pompage sur charbon actif avant et après la période des prélèvements passifs des gaz du sol. Ces prélèvements dynamiques avec charbon ont été pris comme référence au regard de la faible variabilité temporelle des concentrations observées principalement sur les résultats des prélèvements mis en œuvre avant et après les prélèvements de gaz du sol avec les EP¹. En outre, afin de permettre de confirmer ou d'infirmer les tendances observées dans l'évaluation de l'utilisation de ces EP dans les gaz du sol, des prélèvements avec des EP dans l'air à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment ont également été réalisés durant les mêmes campagnes.

¹ Généralement sur l'ensemble des mesures réalisées, d'un facteur 2, entre les concentrations mesurées avec le prélèvement dynamique mis en œuvre avant et après, respectivement de « début d'exposition » et de « fin d'exposition » des échantillonneurs passifs.

Parmi les EP mis en œuvre dans le cadre de ce projet, seuls les résultats de l'« *EP BeSure Sampler - BEACON* » sont exprimés uniquement en masse adsorbée, la société BEACON ne proposant pas la possibilité de les transposer en concentration.

Pour les autres EP utilisés pour les gaz du sol, une conversion de la masse en concentration est proposée par les fournisseurs² avec une équation classique reliant la masse, le taux d'échantillonnage et la durée d'exposition, à l'exception des EP de la société AGI. Pour ces EP, cette conversion nécessite d'ajuster le taux d'échantillonnage à l'air. Cette conversion est basée sur les équations de Millington & Quirk (1961), utilisant certains paramètres complémentaires, des caractéristiques des sols entourant l'EP. Elle tient compte de la résistance à la diffusion accrue, due à la présence de sol et d'eau.

Dans le cadre d'études de screening des gaz du sol (résultats qualitatifs exprimés en masse adsorbée sur le support adsorbant de l'EP), menées pour une reconnaissance qualitative de la contamination d'un site, dans le but notamment d'identifier la ou les zones « source » ou de délimiter le panache gazeux de pollution, les travaux menés ont montré des résultats (en masse) cohérents entre les différents EP utilisés en termes de zonations (zonations identiques des masses maximales et minimales mesurées).

Les résultats des EP pour la caractérisation des gaz du sol mettent en évidence pour certains d'entre eux et pour certaines gammes de concentrations de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au g/m^3 et durées d'exposition (1 à 7 jours) des résultats en concentration comparables à ceux des prélèvements dynamiques avec charbon actif (référence). Il a également été observé pour certains EP, ceux de la société AGI, lors de plusieurs tests (durées d'exposition de 5 et 7 jours) réalisés dans la gamme de concentrations couramment rencontrées dans les études de sites pollués (de la dizaine ou de la centaine de mg/m^3) des résultats qualifiés par AGI comme des valeurs estimées, la masse étant supérieure à la gamme de calibration analytique. Dans ces derniers cas, l'évaluation des performances des EP dans ces conditions d'exposition restent indicatives.

La concentration donnée est dépendante du taux d'échantillonnage (qui représente la quantité de matière adsorbée en fonction du temps). Les conditions d'établissement et les incertitudes inhérentes à l'utilisation de ces taux d'échantillonnage pour une autre durée d'échantillonnage ou un autre niveau de concentration ne sont pas toujours fournies par les fabricants. Ainsi, les incertitudes associées à une utilisation de ces EP en dehors des conditions d'élaboration de ce taux d'échantillonnage par le fabricant, conduisent à recommander une utilisation de ces EP pour des études qualitatives ou semi-quantitatives (uniquement basées sur des ordres de grandeurs des concentrations).

Ainsi, pour le choix des EP, il doit être tenu compte :

- des objectifs de l'étude (screening, diagnostic, surveillance, évaluation des expositions, etc.) vis-à-vis de l'intégration temporelle souhaitée et du type de résultats nécessaires, en masse ou en concentration (les résultats en concentration n'étant pas fournis pour tous les EP),
- des caractéristiques de l'EP tenant compte des spécificités du site (substances, concentrations attendues, durées d'exposition souhaitées, etc.) et de leur géométrie (taux d'échantillonnage, capacité d'adsorption, gammes de validité, etc.), pour lesquelles des échanges avec les fournisseurs sont primordiaux.

En termes de perspectives, il apparaît nécessaire de poursuivre des travaux, plus particulièrement sur la quantification des concentrations dans les gaz du sol avec des EP mis en œuvre dans des trous de sondage de sub-surface non équipés (obturés par un bouchon étanche) ou dans les piézaires. Ces derniers concernent notamment l'étape de conversion en concentration des résultats en masse, la validité de l'intégration à cette conversion, pour certains EP, de paramètres du sol (porosité, etc.) ainsi que des caractéristiques de l'ouvrage (influence du volume d'air entourant l'EP). Des essais complémentaires pourraient être mis en œuvre, afin de consolider le retour d'expérience, principalement en termes de durées d'exposition et de gammes de masses et concentrations attendues pour les gaz du sol, ainsi que l'acquisition de cette information avec d'autres substances (les BTEX³, les fractions TPH-Total Petroleum Hydrocarbons, autres composés organiques volatils-COV). Cela permettrait de proposer des recommandations pour l'utilisation des EP dans différents contextes d'études et les cas pour lesquels les EP peuvent être complémentaires aux techniques de prélèvements dynamiques ou par aspiration naturelle (Canister®).

² Les sociétés AGI et BEACON sont les développeurs des EP et les fournisseurs, et réalisent également les analyses.

³ benzène, toluène, éthylbenzène, xylènes

ABSTRACT

The assessment of soil contamination, transfer mechanisms and impacts in the indoor air through diagnostics first deals with concentrations in soils, water and soil gas as integrative media. In the presence of buildings, located over a source of contamination or a plume, assessment of exposure concentrations is based on diagnoses in indoor air. Recommendations are made in multiple guides for the design, implementation and interpretation of measured concentrations in soil gas and indoor air. Questions remain, however, on the interest and limits on the use of some tools for the characterization of contaminants in soil gas, and the temporal and spatial variability in concentrations in soil gas than in indoor air.

The TEMPAIR research and development project (2014-2016), conducted by BURGEAP and INERIS had for objectives to bring answers to these questions.

The public reports are separated into three parts dealing with different topics. Part 1 referenced as Traverse and al. (2017a) deals with the temporal variability of soil gas and indoor air concentrations, part 2 (present report) addresses the use of passive samplers for soil gas and part 3 referenced as Traverse and al. (2017b) addresses the use of drying agents for the adsorption of perchloroethylene (PCE) and trichloroethylene (TCE) on activated carbon and the need of purge prior to soil gas sampling.

The project is based on measurements conducted at an experimental site contaminated with perchloroethylene (PCE) and to a lesser extent trichloroethylene (TCE) both in vadose and saturated zone.

Passive sampling techniques can be an alternative because they can provide average concentrations over long time periods (from one to several weeks). this feature would allow to integrate the variations not observed during short time period measurements with dynamic sampling (adsorbent-filled tubes) or natural aspiration and would be more appropriate to technical and scientific objectives of some studies (screening of soil gases for source zones, plume, site characterizations, risk assessment, remediation designing, monitoring, etc.).

The project is based on the evaluation of the performance of 5 passive samplers (PS) for soil gas characterization. Three sampling campaigns were conducted in 2014 and 2015. During each campaign, measurements of soil gas were conducted on 7 soil gas wells at different lithological horizons and on « temporary wells » (PS placed into the soil in a small-diameter sealed boring at a depth of about 50 centimeters covering 3 different zones of the site. The selection of soil gas wells and the location of the temporary wells was carried out in order to work with different PCE concentration ranges, from a few $\mu\text{g}/\text{m}^3$ to several hundred mg/m^3 .

The passive samplers tested during time of exposure of 1 to 7 days are :

- BeSure® Sampler marketed by BEACON Environmental Services Inc.,
- PG-0008 marketed by the American company Amplified Geochemical Imaging, LLC (AGI),
- TIPS, currently being developed by the American company Amplified Geochemical Imaging, LLC (AGI),
- the stainless-steel tube with chromosorb sorbent and diffusive cap (since 08/2015) marketed by the American company BEACON Environmental Services Inc.,
- the stainless-steel tube with the Radiello 145 sorbent and diffusive cap conditioned by INERIS, an internal development.

The experiments are based on sampling using several passive samplers as well as dynamic sampling on activated carbon before and after PS exposure in soil gas. The dynamic sampling concentrations were considered as the reference concentrations in this work because of the low temporal variability of the concentrations observed on site. Indoor and outdoor air were also sampled with PS during the same campaigns in order to confirm the trends observed in the evaluation of these PS in soil gas.

The BeSure® Sampler marketed by BEACON, gives results expressed only in adsorbed masses. The possibility of transposing them into concentrations is not offered by BEACON.

For the AGI passive samplers, when measuring concentration values in soils gas, the samplings rate (in air) should be adjusted to account for the increased diffusion resistance due to the presence of soil and water filling pore spaces.

These measurements show that in some cases (concentrations from a few $\mu\text{g}/\text{m}^3$ to some hundred mg/m^3 and exposure time from 1 to 7 days), the results of the passive samplers are comparable to the dynamic sampling. For some PS (AGI), the results of tests carried out in the range of concentrations commonly encountered in polluted site studies (hundreds of mg/m^3) with an exposure time of 5 and 7 days, were qualified by AGI as estimated values. In these cases, the mass was higher than the calibration range. Therefore, the effectiveness evaluation of the PS under these exposure conditions were more difficult.

The concentration given by passive samplers strongly depends on uptake rate. It is necessary to know this value at the installation time and the associated uncertainties when used for another sampling time or concentration level. Nevertheless, these informations are not always provided by the companies or laboratories. In this case, it is recommended to use the PS results as qualitative or semi-quantitative results (only based on orders of magnitude of the concentrations).

The work carried out for screening (qualitative) studies of soil gas showed consistent results in terms of zonation, indicating an identical zonation for each passive sampler and between passive samplers and dynamic sampling.

Passive samplers need to be selected according to :

- the objectives of the study (screening of soil gases for source zones, plume, characterizations, monitoring, evaluation of exposures), taking into account the needs of specific temporal integration, and of the kind of results expected (qualitative or quantitative results),
- characteristics of the passive sampler taking into account the specificities of the site (substances, expected concentrations, desired exposure times, etc.) and their geometry (sampling rate, adsorption capacity, validity ranges, etc.).

Further R & D work is necessary, concerning the quantification of concentrations in soil gases with passive samplers. As outlined in this work conversion from masse to concentrations for the AGI passive samplers needs to be validated with of the integration of soil parameters, as well as the characteristics of the well (influence of the air volume surrounding PS). Further investigations are also needed to consolidate the feedback, mainly for other exposure times, mass and concentration ranges and compounds. This would also make it possible to give recommendations for the use of PS in different studies and the cases where PSs can be complementary to current techniques (dynamic sampling, natural aspiration).

SYNTHESE

I. Préambule

L'évaluation de l'état de pollution du milieu souterrain, des mécanismes de transfert et des impacts de composés organiques volatils dans l'air à l'intérieur des bâtiments est réalisée au travers des diagnostics portant en premier lieu sur les concentrations dans les sols, la nappe et les gaz du sol comme milieu intégrateur. En présence de bâtiments, qu'ils soient situés au droit d'une source de pollution ou dans le panache de pollution, l'estimation des concentrations d'exposition repose sur des mesures dans l'air intérieur. Des recommandations sont formulées dans différents guides pour le dimensionnement, la mise en œuvre et l'interprétation des mesures de concentrations dans les gaz du sol et dans l'air intérieur. Toutefois, compte tenu de la grande variabilité temporelle de ces concentrations, il demeure pour les praticiens des difficultés d'interprétation. Par ailleurs, des questionnements subsistent sur l'intérêt et les limites à l'utilisation de certains outils pour le prélèvement des polluants dans les gaz du sol.

Le projet de recherche TEMPAIR (2014-2016), réalisé par BURGEAP et l'INERIS, a pour objectif d'apporter des éléments de réponse à ces questionnements. Le livrable public du projet se présente en trois parties traitant de sujets distincts. La partie 1, référencée Traverse et al. (2017a) traite de la variabilité temporelle des concentrations dans les gaz du sol et dans l'air intérieur. La partie 2, qui fait l'objet de ce rapport, traite de l'utilisation des échantillonneurs passifs pour les gaz du sol. La partie 3, référencée Traverse et al. (2017b), traite de l'utilisation des filtres anti-humidité pour l'échantillonnage des gaz du sol et de la purge préalable au prélèvement.

Le projet repose sur des mesures et des modélisations conduites sur un site atelier présentant une pollution en tétrachloroéthylène (PCE) et dans une moindre mesure en trichloroéthylène (TCE) dont la source est constituée de phase organique dans les zones non saturée et saturée.

II. La problématique de prélèvement de gaz du sol et les échantillonneurs passifs

La littérature et les guides traitant de la mesure des masses et des concentrations dans les gaz du sol et l'air intérieur (FLUXOBAT (Traverse et al. 2013), ATTENA (ADEME, 2013), CityChlor (ADEME, 2013a, 2014b), BRGM/INERIS (2016), etc.) mettent en exergue la forte variabilité temporelle des concentrations dans ces milieux. De ce fait, la mise en œuvre de prélèvements permettant l'acquisition de « concentrations moyennes » sur une durée de plusieurs jours, permettrait ainsi d'intégrer les variations non observées lors de mesures ponctuelles de courtes durées, et serait plus appropriée aux objectifs techniques et scientifiques de certaines études. Parmi ces derniers sont à citer par exemple, la réalisation de diagnostics dans des études de screening ou ciblées (localisation de sources de pollution, de panache de pollution), l'évaluation de l'exposition des populations, le dimensionnement de travaux de dépollution, la surveillance de l'évolution de l'état des milieux.

Ainsi, afin de mieux intégrer les variations temporelles des concentrations et donc de mieux appréhender des mécanismes de transfert, et *in fine* les expositions des populations, des durées de prélèvement significativement plus longues, d'une à plusieurs semaines seraient plus représentatives, ce qui nécessite la mise en œuvre d'échantillonneurs passifs (EP).

La caractérisation quantitative des gaz du sol, en France, tant dans des ouvrages temporaires de type canne gaz que des ouvrages permanents (piézair), ou pour les ouvrages sous dalle (sub-slab), est classiquement réalisée par la mise en œuvre de prélèvements dynamiques⁴ sur des supports adsorbants, et plus occasionnellement par aspiration naturelle (Canister®), avec des prélèvements d'une durée de quelques heures, 24 heures au maximum pour ce dernier dispositif. Ainsi, actuellement, la mise en œuvre des échantillonneurs passifs pour la caractérisation des gaz du sol, fait plutôt exception dans le domaine des sites et sols pollués, et est encore très limitée, alors que cela n'est pas le cas dans les études de qualité de l'air intérieur. Seuls quelques bureaux d'études américains implantés en France proposent dans certaines de leurs études la mise en œuvre des échantillonneurs passifs pour la caractérisation qualitative dans le cadre d'études de screening de panache de pollution dans les gaz du sol, suite à la mise en place des EP dans des trous de sondage de sub-surface non équipés et obturés par un bouchon étanche (mise en place des EP dans le sol suite au fonçage manuel d'un orifice d'une profondeur de l'ordre de 50 cm).

Plus particulièrement développée aux Etats-Unis, pour les gaz du sol, la technique d'échantillonnage passif est reconnue dans les référentiels de l'US EPA (1997 ; 1958 ; 1998a ; 1998b), l'ASTM (2016). Face à l'essor de ces supports et plus généralement de l'échantillonnage passif, une norme ASTM D7758 :11, a été publiée aux Etats-Unis en 2011, afin d'encadrer les pratiques. Les techniques passives décrites dans cette norme sont

⁴ Les prélèvements dynamiques également dénommés prélèvements actifs.

dédiées aux prélèvements des gaz du sol. Cependant, il est important de souligner que la norme ASTM D7758 :11 considère que les données obtenues grâce aux échantillonneurs passifs sont semi-quantitatives. Par ailleurs, cette technique est avant tout présentée comme un outil de « screening » pour les gaz du sol, permettant la cartographie détaillée de la contamination d'un site, dans le but d'identifier la ou les zones « source » et de délimiter le panache gazeux de pollution.

Néanmoins, même si les Etats-Unis semblent posséder un retour d'expérience sur leur mise en œuvre plus particulièrement pour les gaz du sol dans des trous de sondage de sub-surface non équipés, obturés par un bouchon étanche (mise en place de l'EP dans le sol) ou sous la dalle de bâtiment, et sur leur application, notamment dans des études de screening de site pour la réalisation de cartographie de pollution (caractérisations qualitative (en masse) ou quantitative (en concentration)), les documents actuellement disponibles ne rendent pas compte de manière détaillée des résultats et des spécificités, ni des modalités de choix des EP et de leur mise en œuvre en termes de dimensionnement.

Ces dernières limites avaient précédemment motivé la réalisation d'un projet de recherche sur les échantillonneurs passifs : le projet PassSolAir (ADEME, INERIS, 2017), cofinancé par l'ADEME et le Ministère en charge de l'environnement. Ce projet reposait sur la réalisation de tests en « chambre contrôlée » (chambre INERIS) avec le contrôle notamment de la température, de l'humidité, des gammes de concentrations, couramment rencontrées dans les gaz du sol, pour différentes durées d'exposition, ainsi que leur utilisation sur un site pilote dans des piézaires. Les résultats des tests en chambre avaient notamment donné un premier éclairage quant aux performances des EP en termes de répétabilité, de gammes de concentrations et de durées d'exposition pour le PCE. Cependant, le retour d'expérience acquis dans le projet PassSolAir par le biais de tests en chambre à atmosphère contrôlée et dans des piézaires n'avait pas permis d'une part de confirmer certaines données des fournisseurs concernant leur utilisation durant des durées d'exposition de plusieurs jours pour des gammes de concentrations significatives dans les gaz du sol⁵, ainsi que leur utilisation pour l'obtention des résultats quantitatifs, et d'autre part de tester les EP dans des contextes diversifiés, communément rencontrés dans le domaine des sites et sols pollués (représentativité).. Les constats spécifiques aux tests réalisés et aux spécificités du site pilote n'avaient pas permis d'acquiescer suffisamment de données pour émettre des recommandations satisfaisantes en termes de dimensionnement d'un plan d'échantillonnage. La validité des résultats quantitatifs dans les gaz du sol issus de piézaires restaient à vérifier pour certains EP et certaines gammes de concentrations.

Ainsi, les travaux réalisés dans le cadre du projet TEMPAIR visent à compléter l'état de l'art conduit précédemment dans le projet PassSolAir, ainsi qu'à documenter sur un autre site atelier, le comportement des EP en termes de résultats tant qualitatifs que quantitatifs. Ces nouvelles connaissances visent également à alimenter les guides nationaux, comme cela a été le cas du rapport BRGM, INERIS « 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 » paru fin 2016.

III. Les objectifs

Les objectifs du projet TEMPAIR pour la partie 2, sont :

- de tester l'utilisation des EP dans des piézaires, et également pour une étude de screening, avec la mise en œuvre des EP dans des trous de sondage de sub-surface non équipés et obturés par un bouchon étanche (mise en place des EP dans le sol après fonçage manuel d'un orifice d'une profondeur de l'ordre de 50 cm et de faible diamètre, suffisant pour la mise en place des EP) ;
- d'acquiescer de nouvelles connaissances en termes de maîtrise de ces outils au regard des gammes de concentrations classiquement rencontrées dans le domaine des sites et sols pollués en France, et d'éprouver ces outils pour différentes gammes de concentrations et durées d'expositions et également en présence de fortes concentrations et sur des durées d'exposition plus longues ;
- d'appréhender l'impact de la méconnaissance du milieu (nature de l'horizon, humidité, température, composés) sur l'appréciation quantitative des concentrations dans les gaz du sol ;
- d'évaluer l'intérêt technique (performance, facilité d'utilisation, acquisition d'information sur des temps longs...) et financier du recours aux échantillonneurs passifs dans une démarche de screening sur site pour les gaz du sol, notamment en comparaison de méthodes plus traditionnelles ;
- de proposer des recommandations pour le dimensionnement et l'interprétation des mesures avec des EP.

⁵ Comme cela sera repris ultérieurement, dans ces cas, les résultats ne sont qu'estimés, la masse excédant la limite supérieure de calibration (zone de linéarité du régime d'adsorption).

IV. Les moyens déployés

Des campagnes de mesures ont été réalisées en 2014 et 2015 sur le site atelier, sur des périodes de un à sept jours dans 7 piézaires captant différents horizons lithologiques (remblais, sols sableux, sols limoneux) à différentes profondeurs et sur des périodes de six à sept jours dans 5 trous de sondage de sub-surface non équipés et obturés par un bouchon étanche (mise en place des EP dans le sol suite au fonçage manuel d'un orifice d'une profondeur de l'ordre de 50 cm et de faible diamètre, suffisant pour la mise en place des EP), au droit de 3 différentes zones du site, en présence de gammes de concentrations inférieures à celles rencontrées dans le cadre des tests dans les piézaires. Le choix des piézaires a été réalisé afin de travailler dans des gammes de concentrations en PCE différentes, pour les gaz du sol de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au g/m^3 (et dans l'air, de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à quelques centaines de mg/m^3).

Le Tableau 1 présente chacun des EP mis en œuvre en fonction des milieux investigués⁶ et du type de résultats (en masse ou en concentration). Les EP utilisés permettent un prélèvement intégré des composés pendant toute la durée d'exposition. Les résultats associés sont des données qualitatives et/ou quantitatives. Lorsqu'un résultat en concentration peut être obtenu, il correspond à la concentration moyenne pendant toute la durée d'exposition.







La démarche repose également sur la réalisation de prélèvements à l'aide de plusieurs échantillonneurs passifs et par pompage dynamique sur charbon actif avant et après la période des prélèvements passifs des gaz du sol. Ces prélèvements dynamiques avec charbon ont été pris comme référence au regard de la faible variabilité temporelle des concentrations observées principalement sur les résultats des prélèvements mis en œuvre avant et après les prélèvements de gaz du sol avec les EP⁷).

En outre, afin de permettre de confirmer ou d'infirmer les tendances observées dans les gaz du sol, des prélèvements avec des EP dans l'air à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment (adsorption mieux maîtrisée) ont également été réalisés durant les mêmes campagnes, sur des périodes de 1, 2, 6, 8 jours. Dans ce cas les prélèvements dynamiques avec charbon actif ont été réalisés de manière concomitante. En effet, pour certains EP, ceux de AGI, pour les gaz du sol, l'étape de conversion des résultats, de la masse en concentration, nécessite d'ajuster le taux d'échantillonnage. Cette conversion est basée sur les équations de Millington & Quirk (1961), utilisant certains paramètres complémentaires, des caractéristiques des sols entourant l'EP. Elle tient compte de la résistance à la diffusion accrue, due à la présence de sol et d'eau.

⁶ Il est à souligner que l'EP « corps diffusif avec adsorbant Radiello 145 » n'a pas été mis en œuvre pour des prélèvements de gaz du sol dans le cadre du projet TEMP AIR.

⁷ Généralement sur l'ensemble des mesures réalisées, d'un facteur 2, entre les concentrations mesurées avec le prélèvement dynamiques mis en œuvre avant et après, respectivement de « début d'exposition » et de « fin d'exposition » des échantillonneurs passifs.

TABLEAU 1 - Echantillonneurs utilisés pour les gaz du sol

  BeSure® Sampler (vial en verre avec capuchon grillagé et adsorbants brevetés)	 SPG-0008 (membrane GoreTex® et adsorbants brevetés)	 tube en acier inox avec adsorbant (spherocarb ou carbotrap ou chromosorb 106), avec tête de diffusion depuis 08/2015	 tube en acier inox avec adsorbant (Radiello® 145), avec tête de diffusion 	
Constructeurs/ Fournisseurs/ Analyses	BEACON Environnemental Service Inc (USA)	Amplified Geochemical Imaging LLC - AGI (USA)	BEACON Environnemental Service Inc (USA)	conditionnement d'un tube Perkin Elmer et d'un adsorbant Radiello® 145 (INERIS, développement interne)
Résultats fournis par le laboratoire (*)	En masse			
	Conversion en concentration			

Légende :

(*) : Pour les gaz du sol, dans le cas des EP de AGI, la conversion des résultats de masse en concentration nécessite des paramètres complémentaires (caractéristiques des sols) explicités dans le rapport

V. Les résultats

V.I. Mise en œuvre des EP pour les prélèvements de gaz du sol dans des trous de sondage de sub-surface non équipés et obturés par un bouchon étanche

En ce qui concerne la mise en œuvre des EP dans des trous de sondage de sub-surface non équipés et obturés par un bouchon étanche (mise en place des EP dans le sol suite au fonçage manuel d'un orifice d'une profondeur de l'ordre de 50 cm et de faible diamètre, suffisant pour la mise en place des EP), et le comportement des EP en termes d'études de screening (résultats en masse), la Figure 1 illustre de manière synthétique les tendances des résultats en masse des EP commercialisés plus spécifiquement pour des études de screening⁸, les « EP SPG-0008 - AGI », des « EP TIPS - AGI », et des « EP BeSure Sampler - BEACON », au droit de la zone du jardin du site et de la zone des garages, pour la campagne de novembre/décembre 2014 et d'août 2015. Elle intègre également les résultats associés aux deux piézaires de la zone des garages (Pza3 et Pza4) situés à proximité des ouvrages pérennes.

Au regard des échantillonneurs utilisés⁹, les résultats en masse apparaissent cohérents entre les différents EP en termes de zonations et indiquent une zonation identique pour chacun des trois échantillonneurs passifs en termes de masses maximale (couleur plus foncée) et minimale (couleur plus claire) pour les deux zones étudiées, la zone des jardins et la zone des garages, et cela tant pour la campagne de novembre/décembre 2014 que celle d'août 2015, à l'exception près suivante. Pour la zone des garages, la zonation s'inverse pour la campagne d'août pour les « EP SPG-0008 - AGI » et « EP TIPS - AGI ».

⁸ Pour le « EP BeSure Sampler - BEACON », les résultats sont uniquement des masses adsorbées qui ne sont pas transposées en concentrations.

⁹ Pour rappel, chaque échantillonneur passif a ses propres spécificités.



FIGURE 1 - CARTOGRAPHIE EN MASSE (μg) DU PCE DANS LES GAZ DU SOL DES TROUS DE SONDAGE DE SUB-SURFACE NON EQUIPES ET OBTURES PAR UN BOUCHON ETANCHE ET DES PIEZAIRS POUR LES « EP BESURE SAMPLER - BEACON », « EP SPG-0008 - AGI » ET « EP TIPS - AGI » POUR LES CAMPAGNES DE NOV.-DEC. 2014 ET AOUT 2015

V.II. Mise en œuvre des EP pour les prélèvements de gaz du sol dans des piézairs

En ce qui concerne la mise en œuvre des EP dans des ouvrages pérennes (piézair), et la validité des résultats quantitatifs en concentration, des questionnements restent posés.

En effet, au regard des **gammes de concentration rencontrées (du mg/m³ à quelques centaines de mg/m³) et des durées d'exposition étudiées (de 1 à 7 jours)**, les résultats de ce projet montrent globalement les éléments suivants tenant compte des incertitudes analytiques, synthétisés dans le Tableau 2¹⁰ :

- les concentrations associées aux « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » et « *EP tube avec Radiello 145* » sont globalement dans les mêmes gammes de valeurs, et comparables à celles mesurées lors des prélèvements dynamiques avec charbon actif avant ou après la période de prélèvement passif des gaz du sol ;
- pour les « *EP SPG-0008 - AGI* » et « *EP TIPS - AGI* » et pour les durées d'exposition de plusieurs jours, les concentrations du TIPS sont également dans les mêmes gammes de valeurs que celles des prélèvements dynamiques avec charbon actif, avec dans certains cas des valeurs légèrement supérieures (le « *EP SPG-0008 - AGI* » sous-estime majoritairement les concentrations, jusqu'à un ordre de grandeur). Pour ce dernier, il est à rappeler que ses applications ne concernent pas des gammes de concentrations élevées. Une sous-estimation est également observée pour le « *EP TIPS - AGI* » dans le cas des courtes durées d'exposition. Il est également à souligner que dans plusieurs cas, les concentrations sont qualifiées par le laboratoire comme des valeurs estimées (masse supérieure à la gamme de calibration analytique).

Ainsi, plus particulièrement **pour la durée d'exposition de 7 jours et des gammes de concentration de :**

- **quelques dizaines de µg/m³ à une centaine de µg/m³**, les concentrations sont globalement du même ordre de grandeur que les concentrations mesurées par les prélèvements dynamiques avec charbon actif ;
- **quelques mg/m³**, les concentrations mesurées avec les différents EP utilisés sont très erratiques et globalement inférieures d'un ordre de grandeur aux concentrations mesurées par les prélèvements dynamiques avec charbon actif, à l'exception du « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » et du « *EP tube avec Radiello 145* » pour un seul prélèvement ;
- **l'ordre de la dizaine de mg/m³**, les concentrations mesurées avec l'ensemble des EP utilisés sont globalement du même ordre de grandeur que les concentrations mesurées par les prélèvements dynamiques avec charbon actif.

Pour la durée d'exposition de 5 jours, mais des gammes de concentrations plus élevées, de l'ordre de 100 mg/m³ : les concentrations des « *EP TIPS - AGI* » et « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » sont globalement, similaires aux concentrations mesurées par les prélèvements dynamiques avec charbon actifs. Quant aux concentrations des « *EP SPG-0008 - AGI* » et « *EP tube avec Radiello 145* », elles restent globalement dans la même gamme de concentrations mesurées par les prélèvements dynamiques avec charbon actif.

Par contre **pour des durées d'exposition de 1 et 2 jours et des concentrations de quelques dizaines à une centaine de mg/m³**, seul le « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » et dans certains cas le « *EP tube avec Radiello 145* », donnent des résultats, globalement dans la gamme des concentrations mesurées par les prélèvements dynamiques avec charbon actif. Pour les autres échantillonneurs, elles sont inférieures.

En conclusion, les « *EP TIPS - AGI* » et « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » apparaissent appropriés pour des gammes de concentrations de l'ordre de la centaine de mg/m³ et des durées d'exposition de 5 à 7 jours, également de 1 à 4 jours pour le second cité. Pour le « *EP tube avec Radiello 145* », les résultats restent globalement satisfaisants. Quant au « *EP SPG-0008 - AGI* », il apparaît peu approprié quelles que soient les gammes de concentration et les durées d'exposition étudiées dans le projet.

¹⁰ En termes de commentaires, tenant compte des incertitudes analytiques, il est à souligner que la mention « de concentrations comparables ou similaires » signifie que les concentrations des EP en question et du prélèvement dynamique avec charbon sont « identiques » ; la mention « dans une même gamme » signifie que les facteurs de variation sont au maximum de l'ordre de 5 (avec quelques cas avec des facteurs entre 5 et 10). Dans certains cas avec une variabilité égale ou supérieure à 10, il sera indiqué « ordre de grandeur » ou d'autres facteurs seront mentionnés, comme supérieur à 10 ou plus.

Il est à souligner que la mise en évidence de concentrations pour les « EP SPG-0008 - AGI » inférieures à celles les « EP TIPS - AGI », avait déjà été observée dans le cadre du projet PassSolAir (ADEME, INERIS, 2017), notamment dans le cadre des tests réalisés en chambre contrôlée pour des durées d'exposition s'échelonnant entre 2 et 7 jours. La mise en œuvre d'un seul test, limite la comparaison des résultats de PassSolAir à ceux de TEMPAIR en termes de durées d'exposition.

TABEAU 2 - SYNTHÈSE DES MESURES EN TERMES DE GAMMES DE CONCENTRATION DANS LES GAZ DU SOL DANS LES PIEZAIRES

Concentration de « référence », PA avec CA : moyenne (début - fin des prélèvement des EP) [mg/m ³] (I.A.= 27%)	Durée d'exposition des EP [jour]	Concentration de l'EP au regard de la « concentration de référence » tenant compte des incertitudes analytiques			
		EP SPG-0008 <i>Amplified Geochemical Imaging - AGI (USA)</i> (I.A.= 16%)	EP TIPS (en développement) <i>Amplified Geochemical Imaging - AGI (USA)</i> (I.A.= 16%)	EP tube avec adsorbant chromosorb 106 <i>BEACON Environnemental Service (USA)</i> (I.A.= 50%)	EP tube avec adsorbant Radiello 145 <i>(INERIS, développement interne)</i> (I.A.= 30%)
117 (104 - 130)	1	(*)			
14,7 (14 -)	1				
14,7 (14 - 15)	2	(V)			
14,7 (14 - 15)	4	(V)			
11,7 (9 - 14)	5	(*)			
89 (85 - 92)		(*) (V)	(*) (V)		
152 (174 - 131)		(*)	(*)		
324 (373 - 275)		(*)	(*)	-	
0,06 (0,1 - < 0,03)	7				-
5,7 (5 - 6)		(V)	(V)		
6,5 (3 - 10)					
9,0 (7 - 11)		(*) (V)	(*)		(**)
54 (59 - 49)		-	(*)		(**)
Légende					
EP : échantillonneur passif ; PA : prélèvement dynamique ; CA : Charbon actif ; I.A. : incertitude analytique ; < X : valeur inférieure à la limite de quantification égale à X ; - : EP non utilisé ;					
(*) : valeurs qualifiées par le laboratoire comme des valeurs estimées (masse supérieure à la gamme de calibration analytique) ;					
(**) : valeurs qualifiées par le laboratoire comme des valeurs estimées (sur ou sous-estimation potentielle au regard de la capacité de l'adsorbant Radiello 145).					
Concentration de l'EP :					
similaire		variation < facteur 5 [(V) : cas avec un facteur compris entre 5 et 10]		variation > facteur 10	

V.III. Apports des mesures réalisées dans l'air (adsorption mieux maîtrisée) sur l'expression des résultats en concentration des gaz du sol

Le choix du milieu air dans lequel l'adsorption est mieux maîtrisée que dans les gaz du sol, a été retenu afin de permettre de confirmer ou infirmer les tendances observées dans l'évaluation de l'utilisation de ces EP dans les gaz du sol.

Les mêmes EP que ceux utilisés pour les prélèvements de gaz du sol ont été mis en œuvre, ainsi que le « EP corps diffusif avec Radiello 145 »¹¹.

¹¹ Le corps diffusif avec adsorbant Radiello n'a pas été mis en œuvre pour les prélèvements de gaz du sol dans le cadre de ce projet, mais cela pourrait être envisageable dans le cas de prélèvement de gaz du sol par le biais d'un piézair.

Il ressort des résultats des expérimentations réalisées dans l'air intérieur et extérieur, avec des gammes de concentrations en PCE allant de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à $700 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et des durées d'exposition de 1, 2, 6 ou 8 jours, les informations complémentaires suivantes :

- **pour des faibles concentrations, de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$, et une durée d'exposition de 6 jours**, les concentrations mesurées avec l'ensemble des échantillonneurs utilisés sont globalement similaires et dans la gamme des concentrations mesurées par les prélèvements dynamiques sur charbon actif. Pour la durée de 8 jours, toutes les concentrations sont dans la même gamme de valeurs ;
- **pour des concentrations de l'ordre de plusieurs centaines de $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , et les mêmes durées d'exposition (6 et 8 jours), tous les échantillonneurs indiquent des concentrations similaires à l'exception du « *EP SPG-0008 - AGI* » ;
- **pour des concentrations, de quelques dizaines de $\mu\text{g}/\text{m}^3$, et les durées d'exposition de 1 et 2 jours**, seuls le « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » et le « *EP corps diffusif avec Radiello 145* », donnent des résultats similaires et dans la gamme des concentrations mesurées par les prélèvements dynamiques avec charbon. Pour les autres échantillonneurs, elles sont dans la même gamme de concentrations, à l'exception du « *EP TIPS - AGI* » avec des valeurs inférieures.

En conclusion dans l'air,

- le « *EP TIPS - AGI* » n'apparaît pas approprié pour la caractérisation de faibles concentrations de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pendant ces faibles durées d'exposition dans l'air. Il est à rappeler que ce dernier, en développement, a pour objectif la caractérisation de gammes de concentrations plus élevées et durées d'exposition plus longues ;
- le « *EP SPG-0008 - AGI* » sous-estime les concentrations dans des gammes moyennes de concentration de $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et des durées d'exposition de 6 à 8 jours ;
- les résultats associés aux « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » et « *EP tube avec Radiello 145* » apparaissent globalement satisfaisants, quelles que soient les durées et gammes de concentration dans l'air.

V.IV. Apports des mesures réalisées dans le cadre du projet PassSolAir

Dans le cadre du projet PassSolAir (ADEME, INERIS, 2017), outre des mesures réalisées sur un site pilote dans des piézaires, des tests en « chambre contrôlée » (chambre INERIS) avec le contrôle de la température, de l'humidité avaient été conduits pour des gammes de température, d'humidité, et de concentrations couramment rencontrées dans les gaz du sol et dans cette première étude principalement pour une durée de 2 jours d'exposition.

Dans le cas de ces expérimentations, la démarche de calcul des concentrations des EP a considéré un milieu air (cf. section 2.5).

Les résultats sont mentionnés car associés à d'autres gammes de concentration et durées d'exposition. Ils montrent pour ces conditions d'expérimentations, pour tous les résultats des EP des concentrations similaires ou avec des variations inférieures à un facteur 5 au regard de la concentration de référence (prélèvement dynamique avec charbon actif), aux exceptions suivantes.

Ainsi, pour les durées d'exposition testées, de 2 jours et pour des gammes de concentration supérieures à $5 \text{ mg}/\text{m}^3$, les variations dépassent le facteur 10 pour les résultats des « *EP SPG-0008 - AGI* », qualifiés par ailleurs par le laboratoire d'AGI comme des valeurs estimées (masse supérieure à la gamme de calibration analytique). Il est à souligner que la gamme entre $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$ et $5 \text{ mg}/\text{m}^3$ n'a pas été testée. En ce qui concerne le « *EP TIPS - AGI* », pour des gammes de concentration de $600 \text{ mg}/\text{m}^3$, il apparaît également une variation supérieure à un facteur 10, et un résultat qualifié par le laboratoire d'AGI comme une valeur estimée (la masse excédant la limite supérieure de calibration analytique). La gamme entre $40 \text{ mg}/\text{m}^3$ et $600 \text{ mg}/\text{m}^3$ n'a pas été testée.

VI. Enseignements généraux pour une utilisation appropriée des EP pour les gaz du sol

VI.I. Sélection de l'échantillonneur passif

La sélection de l'échantillonneur passif pour les gaz du sol est fonction :

- des objectifs de l'étude (screening, diagnostic, surveillance, évaluation des expositions, etc.) vis-à-vis de l'intégration temporelle souhaitée et du type de résultats nécessaires, en masse ou en concentration (les résultats en concentration n'étant pas fournis pour tous les EP),
- des caractéristiques de l'EP tenant compte des spécificités du site (substances, concentrations attendues, durées d'exposition souhaitées, etc.) et de leur géométrie (taux d'échantillonnage, capacité d'adsorption, gammes de validité, etc.), pour lesquelles des échanges avec les fournisseurs¹² sont primordiaux.

VI.II. Avantages généraux des échantillonneurs passifs pour les gaz du sol

En termes de mise en œuvre, tant pour les prélèvements d'air à l'intérieur ou l'extérieur d'un bâtiment, que pour les gaz du sol dans un trou de sondage de sub-surface non équipé (obturé par un bouchon étanche) ou dans un piézair, les échantillonneurs passifs testés sont très simples d'utilisation, et rapides à mettre en œuvre, particulièrement dans le cas d'étude de screening des gaz du sol avec la mise en place des EP dans le sol après le fonçage d'un orifice d'une profondeur de l'ordre de 50 cm à 1 m, et de faible diamètre (suffisant pour la mise en place des EP).

Aucun équipement supplémentaire ni aucune source d'énergie extérieure n'est nécessaire sur le terrain. Pour rappel, les prélèvements dynamiques nécessitent quant à eux un contrôle du débit des pompes et en cas de prélèvement de longue durée, généralement de plus de 8 heures, une source d'énergie.

En termes de conditionnement, selon les fournisseurs, le « EP SPG-0008 - AGI » et le « EP TIPS - AGI », le « EP BeSure Sampler - BEACON » n'ont pas besoin d'être conservés ou transportés dans des conditions particulières (ni au froid, ni à l'abri de la lumière) mais simplement dans leur flacon en verre fermé hermétiquement. Pour ceux des sociétés BEACON et AGI, les tests réalisés par les fournisseurs indiquent l'absence d'impact lié au transport dans ces conditions.

En termes de caractéristiques spécifiques des EP, outre la mise en œuvre sur des durées plus longues que les prélèvements dynamiques ou par aspiration naturelle, les avantages suivants sont à souligner :

- en présence de sols peu perméables, pour lesquels la réalisation d'un prélèvement dynamique est problématique, les échantillonneurs passifs s'avèrent intéressants,
- dans le cas de prélèvements de gaz du sol, le taux d'humidité important pouvant s'avérer un frein pour la réalisation de prélèvements dynamiques, certains EP sont intéressants, en particulier ceux constitués d'une membrane hydrophobe ou d'adsorbants hydrophobes, comme les EP de AGI (« EP SPG-0008 - AGI », « EP TIPS - AGI ») composés d'adsorbants hydrophobes placés à l'intérieur d'une membrane en GoreTex® hydrophobe, ou le « EP BeSure Sampler - BEACON » composé d'un vial en verre avec des adsorbants hydrophobes.

En termes de coûts, il est à souligner qu'en présence d'une seule famille de composés, comme les COV ou les BTEX, les coûts associés aux prélèvements dynamiques sur adsorbant seront généralement plus faibles. Cependant, dans le cas d'une grande variété de composés recherchés, les coûts des échantillonneurs passifs plus élevés s'avèrent compétitifs. En soulignant cependant que la représentativité de ces deux modes de prélèvements sera différente, et que pour certains EP, seuls des résultats en masse seront fournis. Dans le cas d'une étude de screening, la mise en place rapide des EP avec des résultats par substance peut dans certains cas s'avérer avantageuse au regard d'une technique plus classique comme des mesures au PID au sein d'ouvrages temporaires de type canne gaz. Cependant, pour ces dernières mesures les résultats seront instantanés.

¹² Dans le cas du « EP SPG-0008 - AGI » et du « EP TIPS - AGI » de la société AGI, du « EP BeSure Sampler - BEACON » et du « EP tube avec chromosorb 106 - BEACON » de la société BEACON, ces sociétés sont les fournisseurs mais réalisent également les analyses.

VI.III. Limites générales des échantillonneurs passifs pour les gaz du sol

Le temps d'exposition des échantillonneurs passifs intégratifs est fonction notamment des concentrations des substances, des limites de quantifications attendues, des taux d'échantillonnage et de la capacité totale de l'adsorbant (pour éviter la saturation). Ces deux dernières informations ne sont que partiellement données par certains fabricants. Il est à noter parallèlement que les taux d'échantillonnage établis par les fabricants, l'ont été pour un domaine de validité, souvent sur des durées d'exposition courtes (de quelques heures à une journée) au regard de certains documents disponibles. La question de leur pertinence pour des temps d'exposition plus longs est abordée dans le cadre de TEMPAIR mais reste cependant posée.

Pour les résultats des mesures dans les gaz du sol exprimés en concentration, l'étape de conversion de la masse en concentration nécessite certains paramètres complémentaires à l'expression classiquement utilisée pour le milieu air. Cela est particulièrement le cas, lors de l'utilisation du SPG-0008 et du TIPS de la société AGI, avec l'introduction d'un facteur différenciant l'échantillonnage de l'air et des gaz du sol. Ce dernier permet d'ajuster le taux d'échantillonnage pour tenir compte de la résistance à la diffusion accrue, due à la présence de sol et d'eau. Cette conversion est basée sur les équations de Millington & Quirk (1961) et nécessite la connaissance de paramètres spécifiques au site, des caractéristiques du sol entourant l'EP. Les valeurs de ces paramètres seront basées :

- soit sur des mesures réalisées en laboratoire à partir d'échantillons prélevés sur site,
- soit issues de calculs ou de la littérature, et en particulier du système de classification des sols SCS¹³ permettant de déterminer la texture en fonction de la granulométrie et de définir des valeurs par défaut pour chaque texture suite à la consultation de bases de données comme celle reprise dans US EPA (2003).

Compte tenu des résultats observés dans le cadre de cette étude, une question reste posée : quelle est la validité des résultats quantitatifs dans les gaz du sol et particulièrement dans le cas des AGI, avec l'introduction du facteur d'ajustement du taux d'échantillonnage pour la conversion des résultats, de la masse en concentration, ce facteur dépendant de caractéristiques du sol entourant l'EP et du choix des valeurs associées ?

Par ailleurs, des questionnements restent également posés au regard de l'utilisation des EP de la société AGI au sein d'ouvrages permanents de type piézair, « avec un volume d'air au contact de l'échantillonneur » *a contrario* du cas des EP placés directement dans un trou de sondage de faible diamètre non équipé (obturé par un bouchon étanche), pouvant avoir un impact sur le calcul de la concentration. En effet, dans le cadre de ce travail, l'impact potentiel du volume d'air et de sol entourant directement l'EP n'a pu être mis en évidence, malgré l'acquisition de résultats d'une part avec des EP placés directement dans des trous de sub-surface (présence d'un volume d'air entourant l'EP très faible), et d'autre part dans le tubage du piézair (présence d'un volume d'air plus important).

La concentration donnée est dépendante du taux d'échantillonnage dont les conditions d'établissement et les incertitudes inhérentes à leur utilisation pour une autre durée d'échantillonnage ou un autre niveau de concentration ne sont pas clairement fournis par les fabricants. Ainsi, les incertitudes associées à une utilisation de ces échantillonneurs passifs en dehors des conditions d'élaboration de ce taux d'échantillonnage par le fabricant, conduisent à une utilisation de ces échantillonneurs préférentiellement pour une étude qualitative ou semi-quantitative (uniquement basée sur des ordres de grandeurs des concentrations).

Il est cependant nécessaire de souligner la robustesse d'un prélèvement dynamique avec adsorbant dont l'obtention du résultat en concentration ne nécessite pas de calcul spécifique à la différence des échantillonneurs passifs.

¹³ SCS : Soil Classification System : le système de classification des sols le plus couramment utilisé en Amérique du nord.

VII. Perspectives

En termes de perspectives, des essais complémentaires pourraient être mis en œuvre, afin de consolider un retour d'expérience plus conséquent, principalement en termes de durées d'exposition et de gammes de masses et de concentrations attendues pour les gaz du sol. Cela permettrait de proposer des recommandations pour l'utilisation des EP dans différents contextes d'études et les cas pour lesquels les EP peuvent être complémentaires aux techniques de prélèvements dynamiques ou par aspiration naturelle (Canister®).

Par ailleurs, malgré le fait qu'un prélèvement avec un EP permet d'intégrer la variabilité temporelle, la fiabilité des résultats exprimés en concentration doit être assurée, au regard d'une concentration issue d'un prélèvement dynamique ou par aspiration naturelle (Canister®) d'une durée plus courte et donc *a priori* moins représentative.

Ainsi, il apparaît également nécessaire de poursuivre des travaux, plus particulièrement sur la quantification des concentrations dans les gaz du sol avec des EP mis en œuvre dans des trous de sondage de sub-surface non équipés (obturés par un bouchon étanche) ou dans les piézaires. Ces travaux devront notamment être axés sur la conversion en concentration des résultats en masse, la validité de l'intégration à cette conversion pour certains EP, des paramètres du sol (porosité, etc.) ainsi que des caractéristiques des ouvrages (influence du volume d'air entourant l'EP).

Dans le cas d'un objectif d'évaluation prospective des risques sanitaires chroniques, en l'absence de mesures réalisées directement dans le milieu d'exposition (air intérieur), les évaluations prospectives des risques nécessitent l'utilisation de résultats soit issus de mesures des concentrations dans les sols ou dans les gaz du sol, comme paramètre d'entrée d'une modélisation des transferts de vapeurs pour l'évaluation des expositions des populations. C'est pourquoi, la fiabilité des résultats exprimés en concentration des gaz du sol issus plus particulièrement de prélèvements dans des piézaires devra être assurée, ainsi que les incertitudes associées connues.

Dans le cadre des projets PassSolAir et TEMPAIR, les contaminations des sites concernaient principalement les COV. Il serait utile de mener des expérimentations sur d'autres familles de substances comme les BTEX, les fractions TPH, autres COV, etc.

1. Contexte général, problématique, objectifs et moyens

1.1 Contexte général

En France, la gestion des sites et sols pollués repose sur le principe de gestion suivant l'usage, et se décline par les documents méthodologiques de février 2007 (en cours de révision) et les prestations encadrées par la norme NF X 31-620 (2011). En présence de composés organiques volatils (COV) dans les sols, la pollution dans les gaz du sol et son impact sur l'air intérieur constitue une part significative de l'impact du passif environnemental du site.

A côté de ce cadre de gestion, la dynamique des Lois Grenelle incite les collectivités à limiter l'étalement urbain et à renouveler la ville sur la ville, générant ainsi une accélération du rythme de reconversion de sites. Les communautés urbaines de France estiment qu'au cours des 5 dernières années, les surfaces reconverties représentent plus d'un millier et demi d'hectares (ACUF, 2010). Dans ce contexte, la reconquête des friches urbaines constitue un enjeu important.

A ce titre, la loi n°2014-366 du 24 mars 2014 dite loi ALUR prévoit la création de Secteurs d'Information sur les Sols (SIS) qui comprendront à partir de 2018 les terrains où la connaissance de la pollution des sols justifie la réalisation d'études de sols et de mesures de gestion de la pollution pour préserver la santé et l'environnement en reprenant les terrains identifiés dans BASOL et BASIAS¹⁴. Parallèlement, les articles L556-1 et 556-2 du code de l'environnement précisent que le maître d'ouvrage à l'initiative d'un changement d'usage doit faire attester de la prise en compte des mesures de gestion dans le projet par un bureau d'étude certifié dans le domaine des sites et sols pollués.

Dans ce contexte, l'évaluation de l'état de pollution du milieu souterrain, des mécanismes de transfert et des impacts dans l'air à l'intérieur des bâtiments sont réalisés au travers de diagnostics portant en premier lieu sur les concentrations dans les sols, la nappe et les gaz du sol comme milieu intégrateur. En second lieu, en présence de bâtiments localisés sur site ou dans le panache de pollution, l'estimation des concentrations d'exposition repose sur des diagnostics dans l'air intérieur.

Des questionnements subsistent à l'heure actuelle sur l'intérêt et les limites à l'utilisation de certains outils pour le prélèvement des polluants dans les gaz du sol, notamment sur l'utilisation des échantillonneurs passifs pour les prélèvements de gaz du sol.

Ainsi, les objectifs du projet TEMPAIR (2014-2016) s'articulent autour des difficultés et interrogations pour la caractérisation des concentrations dans les gaz du sol et dans l'air intérieur portant sur :

- Partie 1 : la variabilité temporelle des concentrations dans les gaz du sol et dans l'air intérieur,
- Partie 2 : l'évaluation des échantillonneurs passifs dans les gaz du sol,
- Partie 3 : l'intérêt de l'usage de filtres anti-humidité et l'influence de la purge préalable pour le prélèvement de polluants dans les gaz du sol.

Le présent document traite de la partie 2, les deux autres parties font l'objet de documents spécifiques référencés Traverse et al. (2017a) et Traverse et al. (2017b).

1.2 Etat de l'art et problématique

La littérature et les guides traitant de la mesure des masses et des concentrations dans les gaz du sol et l'air intérieur (FLUXOBAT (Traverse et al. 2012), ATTENA (ADEME, 2013), CityChlor (ADEME, 2013a, 2013b), BRGM/INERIS (2016), etc.) mettent en exergue la forte variabilité temporelle des concentrations dans ces milieux. De ce fait, la mise en œuvre de prélèvements permettant l'acquisition de « concentrations moyennes » sur une durée de plusieurs jours, permettrait ainsi d'intégrer les variations non observées lors de mesures ponctuelles de courtes durées, et serait plus appropriée aux objectifs techniques et scientifiques de certaines études (par exemple la réalisation de diagnostics, l'évaluation de l'exposition des populations, le dimensionnement de travaux de dépollution, la surveillance de l'évolution de l'état des milieux, etc.).

¹⁴ Aujourd'hui BASOL recense 5800 sites pollués incluant les terrains pour lesquels l'Etat a été informé de l'existence d'une pollution tandis que BASIAS recense 262 000 sites qui ont accueilli par le passé une activité industrielle ou de service et qui sont donc susceptibles de présenter des pollutions.

Ainsi, afin de mieux intégrer les variations temporelles des concentrations et donc de mieux appréhender des mécanismes de transfert, et *in fine* les expositions des populations, des durées de prélèvement significativement plus longues, d'une à plusieurs semaines seraient plus représentatives, ce qui nécessite la mise en œuvre d'échantillonneurs passifs.

En ce qui concerne les gaz du sol, en France, tant dans des ouvrages temporaires de type canne gaz que des ouvrages pérennes (piézair), ou pour les ouvrages sous dalle (sub-slab), leur caractérisation quantitative est classiquement réalisée par la mise en œuvre de prélèvements dynamiques sur des supports adsorbants, et plus occasionnellement par aspiration naturelle (Canister®), avec des prélèvements d'une durée de quelques heures, 24 heures au maximum pour ce dernier dispositif.

Cependant, ces techniques mises en œuvre par le biais de prélèvements dynamiques sur des supports adsorbants, et plus occasionnellement par aspiration naturelle (Canister®) possèdent certaines limites outre les durées d'exposition. Elles concernent notamment la sensibilité de ces techniques « usuelles » aux taux d'humidité présents dans le milieu gaz du sol. Des taux d'humidité significatifs, de l'ordre de 70 à 90% sont classiquement mesurés dans les ouvrages temporaires de type canne gaz et les ouvrages permanents (piézairs). En effet, dans le cadre du projet TEMPAIR, la partie 3 traite de l'utilisation de filtres anti-humidité et de la purge préalable pour l'échantillonnage dans les gaz du sol de pollutions volatiles par du tétrachloroéthylène¹⁵ (PCE) et du trichloroéthylène (TCE). De ces travaux réalisés, il ressort que l'utilisation de filtres anti-humidité pour les prélèvements de gaz du sol en conditions humides visant la quantification des concentrations en PCE et TCE comprises respectivement entre 5 et 250 mg/m³ et 0,01 et 1,3 mg/m³ et pour des volumes de prélèvement inférieurs à 20 litres ne présente pas d'intérêt significatif.

Les techniques dites à aspiration naturelle, tel que le Canister® peuvent être une alternative en termes de durées d'exposition (cependant au maximum de 48 heures), de praticité avec l'absence de source d'énergie et s'affranchissant de l'impact de la vapeur d'eau notamment sur la capacité totale d'adsorption des supports avec adsorbant. Il est cependant nécessaire de souligner le fait que les techniques analytiques utilisées pour l'analyse de la matrice gazeuse prélevée sont également sensibles à l'humidité (chromatographie) et nécessitent toute l'attention lors de la phase d'analyse.

Tenant compte des limites précitées (durées d'exposition, nécessité de source d'énergie pour les prélèvements dynamiques, impact potentiel des taux d'humidité importants) et afin de répondre à ces besoins de représentativité des résultats, d'autres techniques de prélèvement peuvent être envisagées pour les gaz du sol : les échantillonneurs passifs (EP) mis en œuvre dans des trous de sondage non équipés ou des ouvrages permanents (piézairs), ou sous-dalle de bâtiment (sub-slab), avec pour certains, également la présence de membranes et/ou d'adsorbants hydrophobes.

Les EP avec la possibilité d'une utilisation sur des durées de prélèvement significativement plus longues, de une à plusieurs semaines, devraient également permettre de mieux appréhender les évolutions temporelles des concentrations dans les gaz du sol et donc des mécanismes de transfert au regard des facteurs environnementaux, ainsi que la représentativité temporelle des résultats mesurés dans les gaz du sol. Cependant, en l'absence de mesures directes dans le milieu d'exposition (air intérieur), une évaluation prospective des risques sanitaires chroniques nécessite l'utilisation de résultats issus de mesures des concentrations dans les sols ou dans les gaz du sol, comme paramètre d'entrée d'une modélisation des transferts de vapeurs pour l'évaluation des expositions des populations. C'est pourquoi, la fiabilité des résultats exprimés en concentration dans les gaz du sol issus plus particulièrement de prélèvements dans des piézairs devra être assurée, ainsi que les incertitudes associées connues.

Ainsi actuellement, pour la caractérisation des gaz du sol, la mise en œuvre des échantillonneurs passifs fait plutôt exception dans le domaine des sites et sols pollués, et est encore très limitée, alors que cela n'est pas le cas dans les études de qualité de l'air intérieur. Actuellement, seuls quelques bureaux d'études américains implantés en France proposent dans certaines de leurs études la mise en œuvre des échantillonneurs passifs dans des trous de sondage de sub-surface non équipés (obturés par un bouchon étanche), pour la caractérisation qualitative dans le cadre d'études de screening de panache de pollution dans les gaz du sol.

Plus particulièrement développée aux Etats-Unis, pour les gaz du sol, la technique d'échantillonnage passif est reconnue dans les référentiels de l'US EPA (1997 ; 1958 ; 1998a ; 1998b) et de l'ASTM (2016). Face à l'essor de ces supports et plus généralement de l'échantillonnage passif, une norme ASTM D7758 :11, a été publiée aux Etats-Unis en 2011, afin d'encadrer les pratiques. Les techniques passives décrites dans cette norme sont dédiées au prélèvement des gaz du sol. Ce document met en avant la simplicité d'utilisation et le faible coût des échantillonneurs passifs. Ces deux aspects permettent la réalisation d'un nombre important de

¹⁵ ou perchloroéthylène

prélèvements. Cependant, il est important de souligner que la norme ASTM D7758 :11 considère que les données obtenues grâce aux échantillonneurs passifs sont semi-quantitatives.

Cette technique est avant tout présentée comme un outil de « screening » pour les gaz du sol, permettant la cartographie détaillée de la contamination d'un site, dans le but d'identifier la ou les zones « source » et de délimiter le panache gazeux de pollution. Il est spécifié que les échantillonneurs passifs peuvent être mis en œuvre dans une grande variété de contextes géologiques et permettent la caractérisation de composés organiques volatils (COV) et semi-volatils (COSV). D'autres composés tels que le mercure élémentaire ou encore d'autres composés plus spécifiques peuvent également être caractérisés à condition d'utiliser des échantillonneurs et des méthodes analytiques adaptés.

Néanmoins, même si les Etats-Unis semblent posséder un retour d'expérience sur leur mise en œuvre plus particulièrement pour les gaz du sol dans des ouvrages temporaires de type trou de sondage non équipé (obturé par un bouchon étanche), ou sous la dalle de bâtiment, et sur leur application, notamment dans des études de screening de site pour la réalisation de cartographie de pollution (caractérisations qualitative (en masse) ou quantitative (en concentration)), les documents actuellement disponibles ne rendent pas compte de manière détaillée des résultats et des spécificités, ni des modalités de choix des EP et de leur mise en œuvre en termes de dimensionnement.

Ces dernières limites ont notamment motivé la réalisation d'un projet de recherche PassSolAir (ADEME, INERIS, 2017), cofinancé par l'ADEME et le Ministère en charge de l'environnement. Plusieurs échantillonneurs passifs (cf. Tableau 1) ont déjà été mis en œuvre sur le site pilote du projet CityChlor (ADEME 2013a, b) ainsi que des prélèvements classiques par pompage dynamique sur charbon actif, mais avec un nombre limité de campagnes et sur des durées de prélèvements assez courtes. En effet, tenant compte des recommandations des fabricants, transmises lors d'échanges, relatives aux spécificités du site et aux concentrations attendues, les durées de prélèvement n'ont pas dépassé l'heure ou quelques heures au regard de leur performance.

Le projet PassSolAir reposait sur :

- la réalisation de tests en « chambre contrôlée » (chambre INERIS) avec le contrôle notamment de la température, de l'humidité, des gammes de concentrations, couramment rencontrées dans les gaz du sol, pour différentes durées d'exposition. Les résultats de ces tests ont donné un premier éclairage quant aux performances des EP en termes de répétabilité, de gammes de concentrations et de durées d'exposition pour le PCE comme synthétisé ci-après ;
- l'utilisation des EP sur un site pilote, avec ses spécificités, lors de deux campagnes.

Cependant, le retour d'expérience acquis dans PassSolAir n'avait pas permis d'une part de confirmer certaines données des fournisseurs concernant leur utilisation durant des durées d'exposition de plusieurs jours pour des gammes de concentrations significatives dans les gaz du sol¹⁶, ainsi que leur utilisation pour l'obtention des résultats quantitatifs, et d'autre part de tester les EP dans des contextes diversifiés, communément rencontrés dans le domaine des sites et sols pollués (représentativité).

Les constats spécifiques aux tests réalisés et aux spécificités du site pilote n'avaient pas permis d'acquérir suffisamment de données pour émettre des recommandations satisfaisantes en termes de dimensionnement d'un plan d'échantillonnage. La validité des résultats quantitatifs dans les gaz du sol issus de piézairs restaient également à vérifier pour certains EP et certaines gammes de concentrations.

Ainsi, les travaux réalisés dans le cadre du projet TEMPAIR visent à compléter l'état de l'art conduit précédemment dans le projet PassSolAir et à documenter sur un autre site atelier, le comportement des EP en termes de résultats tant qualitatifs que quantitatifs. Il est à souligner que le projet TEMPAIR a bénéficié de la mise à disposition d'un site pilote avec d'autres spécificités que celui de PassSolAir, permettant la réalisation d'autres protocoles expérimentaux. Ce site a permis la mise en œuvre des EP non seulement dans des piézairs, mais également dans des trous de sondage de sub-surface non équipés et obturés par un bouchon étanche. Des données lithologiques, des paramètres physiques des sols, nécessaires plus particulièrement pour l'étape de conversion des résultats des gaz du sol de masse en concentration pour les EP de la société AGI étaient également connus.

Ces nouvelles connaissances visent également à alimenter les guides nationaux, comme cela a été le cas du rapport BRGM, INERIS « 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 » paru fin 2016.

¹⁶ Comme cela sera repris ultérieurement, dans ces cas, les résultats ne sont qu'estimés, la masse excédant la limite supérieure de calibration.

1.3 Objectifs

Le projet TEMPAIR capitalisant également le retour d'expérience du projet PassSolAir, un objectif complémentaire porte sur l'évaluation de l'intérêt technique (performance, facilité d'utilisation, acquisition d'informations sur des temps longs...) du recours aux échantillonneurs passifs dans une démarche de screening sur site pour les gaz du sol avec des EP mis en œuvre dans des trous de sondage de sub-surface non équipés, de faible diamètre (suffisant pour la mise en place des EP) et obturés par un bouchon étanche, notamment en comparaison de méthodes plus traditionnelles mise en œuvre dans des ouvrages temporaires de type canne gaz (comme la mesure à l'aide d'un analyseur en ligne, d'un appareil à photoionisation (PID - détecteur par photo-ionisation), à ionisation de flamme (FID), ou autres dispositifs (tubes réactifs colorimétriques, etc.) qui apporteront des réponses spécifiques (propre à un ou des composés) ou non (valeur semi-quantitative pour un ensemble de substances).

Enfin, la mise en œuvre sur un autre site pilote que celui du projet PassSolAir permet en termes de représentativité de diversifier les différentes situations rencontrées dans le domaine des sites et sols pollués et de mieux cerner les performances des EP.

Les objectifs du projet TEMPAIR sont donc :

- d'éprouver ces outils dans des piézaires, et dans une autre configuration, une étude de screening, avec la mise en œuvre des EP dans des trous de sondage de sub-surface non équipés et obturés par un bouchon étanche (mise en place des EP dans le sol après fonçage manuel d'un orifice d'une profondeur de l'ordre de 50 cm) ;
- d'acquérir de nouvelles connaissances en termes de maîtrise de ces outils au regard des gammes de concentrations classiquement rencontrées dans le domaine des sites et sols pollués en France et d'éprouver ces outils pour différentes gammes de concentrations et durées d'expositions, et également en présence de fortes concentrations et sur des durées d'exposition plus longues, notamment pour ce dernier cas, avec un autre échantillonneur passif intégratif de la société AGI, actuellement en développement ;
- d'appréhender l'impact de la méconnaissance du milieu (nature de l'horizon, humidité, température, composés) en termes d'appréciation quantitative des concentrations dans les gaz du sol ;
- d'évaluer l'intérêt technique (performance, facilité d'utilisation, acquisition d'information sur des temps longs...) et financier du recours aux échantillonneurs passifs dans une démarche de screening sur site pour les gaz du sol, notamment en comparaison de méthodes plus traditionnelles ;
- de proposer des éventuelles recommandations pour le dimensionnement et l'interprétation des mesures avec des EP.

Avertissement :

Il est à souligner que les résultats acquis sur site, les éléments d'interprétation et de conclusion tiennent compte des caractéristiques spécifiques du site pilote (gammes de concentrations, nature des lithologies en présence, surface piézométrique, ouvrages de prélèvement, etc.).

1.4 Moyens déployés

1.4.1 Site atelier

1.4.1.1 Contexte environnemental

Le projet TEMPAIR repose sur la conduite de mesures sur un site atelier au droit duquel la pollution en présence est composée de manière largement majoritaire de tétrachloroéthylène (PCE) et de façon minoritaire par du trichloroéthylène (TCE). Le site atelier est décrit ci-dessous.

Le site atelier a été exploité pour une activité de traitement de surface chimique et par électrolyse, de 1952 à 2005. Il s'agissait d'une ICPE (Installation Classée pour la Protection de l'Environnement) soumise à autorisation. Les études environnementales ont mis en évidence une pollution des sols par des métaux et le tétrachloroéthylène (PCE), et dans une moindre mesure du trichloroéthylène (TCE), au droit du site. La source de PCE sous forme de phase organique est présente dans la zone non saturée et dans la zone saturée sous une partie (Sud-ouest) de l'atelier et en extérieur (voir la Figure 2).

Les données historiques et les diagnostics disponibles mettent en évidence la présence de solvants chlorés principalement dans l'angle Sud-Ouest de l'atelier de traitement de surface, ainsi qu'au Sud de cet atelier (auvent attenant à l'atelier et cour intérieure). L'auvent se compose d'une toiture, d'un mur commun au nord

avec l'atelier et d'une façade au sud constituée d'un muret de 1 m de hauteur surmonté par des fenêtres détériorées.

Le local dans l'atelier, dans lequel les mesures de concentrations dans l'air intérieur ont été conduites est visualisé sur la Figure 2, il s'agit de l'ancien atelier de traitement de surface dans la zone nord-ouest du bâtiment.

Le site atelier du projet TEMPAIR a été équipé dans le cadre du projet FLUXOBAT au cours duquel des mesures ont été réalisées. Elles sont présentées dans les annexes du guide méthodologique FLUXOBAT (Traverse et al. 2013). Les piézaires objet de mesures dans le cadre du projet TEMPAIR ainsi que les zones avec les trous de sondage de sub-surface non équipés sont indiqués sur la Figure 2.



FIGURE 2 - LE SITE ATELIER

Géologie

Sous une dalle béton de 5 cm dans l'atelier central et la cour, et de 20 cm dans l'atelier de traitement, les sondages ont montré une lithologie relativement homogène sur l'ensemble du site :

- remblais hétérogènes sur environ 0,5 à 1 m d'épaisseur, constitués de sables et graviers dans l'atelier central et la cour, et de sables limoneux dans l'atelier de traitement,
- limons bruns jusqu'à environ 2,5 à 3 m, qui deviennent sableux avec la profondeur, le sable devenant majoritaire sur certains sondages,
- sables, graviers, galets, jusqu'à environ 20 mètres de profondeur.

Hydrogéologie

La nappe alluviale présente une épaisseur de zone saturée d'environ 20 m. La perméabilité horizontale moyenne est en moyenne de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-3} m/s. La nappe est libre. Le niveau de la nappe est situé vers 4,5/5 m de profondeur au droit du site. La direction des écoulements est orientée d'Est en Ouest en direction du fleuve situé à plusieurs centaines de mètres.

1.4.1.2 Réseau de points de mesure

Le site atelier a été équipé dans le cadre du projet FLUXOBAT d'ouvrages permanents permettant de capter les gaz du sol (piézaires) et d'ouvrages permettant de capter la nappe alluviale (piézomètres). L'ensemble de ces ouvrages sont représentés sur la Figure 3, aussi que les trous de sondage de sub-surface non équipés, de faible diamètre (suffisant pour la mise en place des EP) et obturés par un bouchon étanche mis en œuvre dans le projet TEMPAIR.

La majorité des ouvrages permanents sont situés sous la dalle du bâtiment, seuls 4 ouvrages sont situés au niveau de la source en extérieur du bâtiment (pza39-42) et 3 ouvrages dans le panache gazeux en aval du site (pza2 puis pza3 et pza4). Les profondeurs des zones crépinées de ces ouvrages sont présentées sur la Figure 3.

Les piézairs siège de prélèvements de gaz du sol avec des EP correspondent à différents design¹⁷.

Quant aux trous de sondage non équipés¹⁸, ils sont situés dans la zone de jardin au sud de la zone de l'atelier et dans la zone des garages située au sud-ouest de la zone atelier.

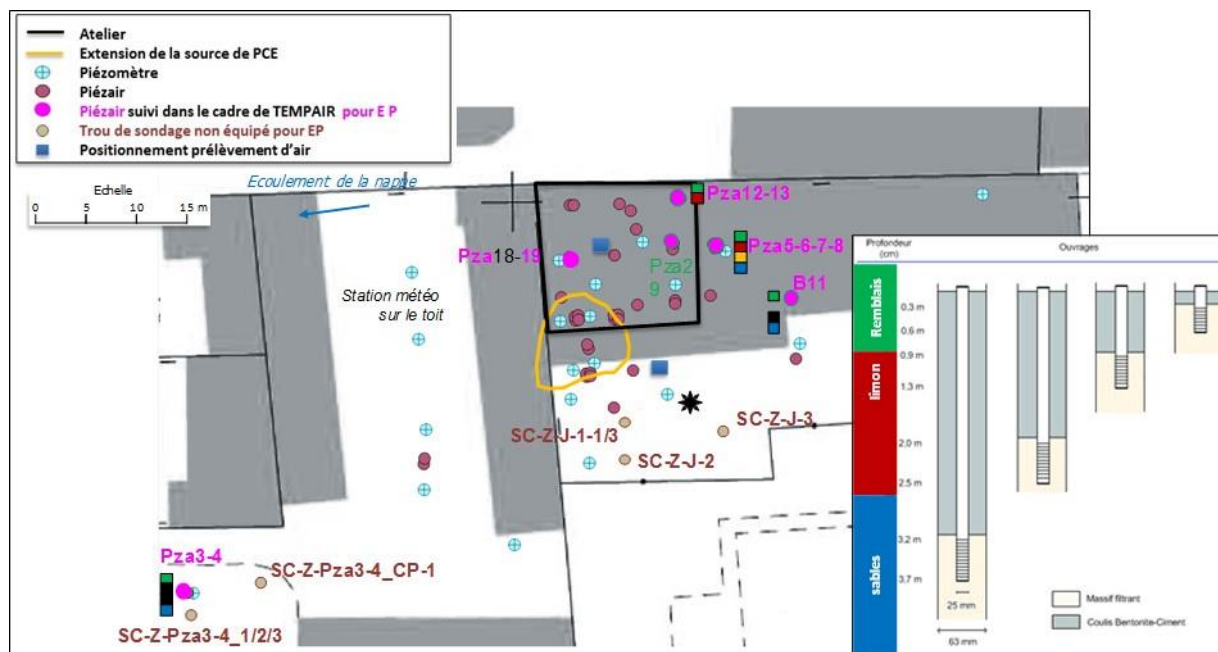


FIGURE 3 - LOCALISATION DES PIEZAIRES (PZA) AVEC LEURS CARACTERISTIQUES ET DES TROUS DE SONDAGE NON EQUIPES ET OBTURES PAR UN BOUCHON ETANCHE (SC) DANS LESQUELS LES PRELEVEMENTS ONT ETE REALISES

¹⁷ Les caractéristiques générales des piézairs siège de prélèvements de gaz du sol avec des EP sont les suivantes :

Référence du point de prélèvement	Profondeur du haut de la crépine du piézair (m)	Profondeur du bas de la crépine du piézair (m)	Epaisseur de la crépine du piézair (m)	Lithogie de l'horizon capté	Profondeur du prélèvement (m)
B11 - piézair simple (1)	0,2	3,9	2,7	Remblais, limons et sables et graviers	3,7
Pza5 - quadruplet	0,3	0,6	0,3	Remblais	0,4
Pza6 - quadruplet	0,9	1,3	0,4	Limons	1,1
Pza7 - quadruplet	2,0	2,5	0,5	Limons	2,3
Pza12 - doublet	0,45	0,75	0,3	Remblais sableux	0,6
Pza13 - doublet	1,1	3,9	0,4	Limons	1,3
Pza19 - doublet	0,3	0,6	0,3	Remblais	0,4
Pza3 - doublet (2)	3	3,5	0,5	Sable limoneux et graviers	2,2
Pza4 - doublet (3)	0,5	1	0,5	Remblais sablo-limoneux avec graviers et briques	0,7

Légende

(1) : Lors des échanges avec les laboratoires, cet ouvrage au droit du site pilote était nommé Pza4.

(2) : Lors des échanges avec les laboratoires, cet ouvrage au droit de la zone des garages était nommé Z-G-Pza3.

(3) : Lors des échanges avec les laboratoires, cet ouvrage au droit de la zone des garages était nommé Z-G-Pza4.

¹⁸ Mise en place des EP dans des trous de sondage de sub-surface non équipés et obturés par un bouchon étanche (mise en place dans le sol suite au fonçage manuel d'un orifice d'une profondeur de l'ordre de l'ordre de 50 cm et d'un diamètre de l'ordre de 2 à 3 cm).

1.4.2 Campagnes de mesures

Afin d'évaluer les échantillonneurs passifs dans les gaz du sol, le projet repose sur l'acquisition et l'interprétation de données issues de plusieurs campagnes de mesures sur le site.

Trois campagnes de prélèvements ont été réalisées en 2014 et 2015 sur le site atelier qui a été décrit précédemment sur des périodes de un à huit jours dans 7 piézaires captant différents horizons lithologiques (remblais, sols sableux, limoneux) à différentes profondeurs (cf. section 3.2) et dans 5 trous de sondage de sub-surface non équipés et obturés par un bouchon étanche (mise en place des EP dans le sol suite au fonçage manuel d'un orifice d'une profondeur de l'ordre de 50 cm), au droit de 3 différentes zones du site, dans la zone des jardins et des garages.

Le choix des piézaires et des zones des trous de sondage de sub-surface non équipés a été réalisé afin de travailler dans des gammes de concentrations en perchloroéthylène (PCE) différentes, pour les gaz du sol de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au g/m^3 et pour l'air de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à quelques centaines de mg/m^3 .

Les campagnes se sont déroulées en périodes estivales et hivernales, afin également de couvrir des conditions de transfert différentes et donc *a priori* des gammes de concentrations différentes.

En outre, afin de permettre de confirmer ou infirmer les tendances observées dans l'évaluation de l'utilisation des EP dans les gaz du sol, des prélèvements dans l'air à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment ont également été réalisés durant les mêmes campagnes, sur des périodes de 1, 2, 6 et 8 jours.

Les moyens déployés lors des campagnes de mesures reposent également sur la réalisation de prélèvements légèrement décalés pour les gaz du sol (en début de période de prélèvements avec les EP et dans certains cas également en fin des périodes de prélèvements) ou concomitants pour l'air intérieur et extérieur à l'aide de prélèvements dynamiques sur des supports composés d'un adsorbant (charbon actif d'une masse de 50 mg de la marque SKC comportant deux zones, une zone de mesure et une zone de contrôle).

1.4.3 Echantillonneurs passifs utilisés

Les échantillonneurs passifs (EP) utilisés sont des échantillonneurs passifs « intégratifs » permettant un prélèvement intégré des composés pendant toute la durée d'exposition, dont les résultats associés sont des données qualitatives (masse absorbée) et/ou quantitatives (conversion des masses en concentrations) en fonction des EP. Lorsqu'un résultat en concentration peut être obtenu, il correspond à la concentration moyenne pendant toute la durée d'exposition. Leur fonctionnement est explicité en section 2.3.







Le Tableau 3 synthétise chacun des dispositifs mis en œuvre en fonction des milieux investigués¹⁹ et du type de résultats proposés par les fabricants et/ou laboratoires²⁰, des résultats en masse et/ou en concentration, qui seront détaillés en section 2.6.1. Dès à présent, il est cependant à souligner que dans un document de 2016 de l'US EPA, il est indiqué que les échantillonneurs passifs Sorber® ou Modules Gore® de Amplified Geochemical Imaging (AGI), BeSure Sample de BEACON Environmental Services sont des dispositifs semi-quantitatifs, quantifiant des masses, mais dont les taux d'échantillonnage sont incertains, conduisant ainsi à des expressions de résultats en concentrations moins fiables²¹ (Hodny et al, 2009 ; Odencrantz and O'Neill, 2009). Des éléments concernant cette étape de conversion des masses en concentrations sont explicités en section 2.5 et particulièrement dans le cas des EP de AGI pour les gaz du sol nécessitant la connaissance de paramètres complémentaires, des caractéristiques des sols, et illustrés ensuite par le biais des expérimentations réalisées.

¹⁹ Il est à souligner que le l'EP « corps diffusif avec adsorbant Radiello 145 » n'a pas été mis en œuvre pour des prélèvements de gaz du sol dans le cadre du projet TEMPAIR.

²⁰ Dans le cas du « EP SPG-0008 - AGI » et du « EP TIPS - AGI » de la société AGI, du « EP BeSure Sampler - BEACON » et du « EP tube avec chromosorb 106 - BEACON » de la société BEACON, ces sociétés sont les fournisseurs mais elles réalisent également les analyses chimiques.

²¹ Pour le « EP BeSure Sampler - BEACON », les résultats sont uniquement des masses adsorbées qui ne sont pas transposées en concentrations par BEACON.

TABLEAU 3 - ECHANTILLONNEURS PASSIFS UTILISES POUR LES GAZ DU SOL

  BeSure® Sampler (vial en verre avec capuchon grillagé et adsorbants brevetés)	 SPG-0008 (membrane GoreTex® et adsorbants brevetés)	 tube en acier inox avec adsorbant (spherocarb ou carbotrap ou chromosorb 106), avec tête de diffusion depuis 08/2015	 tube en acier inox avec adsorbant (Radiello® 145), avec tête de diffusion 	
Constructeurs/ Fournisseurs/ Analyses	BEACON Environnemental Service Inc (USA)	Amplified Geochemical Imaging LLC - AGI (USA)	BEACON Environnemental Service Inc (USA)	conditionnement d'un tube Perkin Elmer et d'un adsorbant Radiello® 145 (INERIS, développement interne)
Résultats fournis par le laboratoire (*)	En masse			
	Conversion en concentration			

Légende :

(*) : Pour les gaz du sol, dans le cas des EP de AGI, la conversion des résultats de masse en concentration nécessite des paramètres complémentaires (caractéristiques des sols) explicités dans le rapport

2. Revue de la littérature

2.1 Pratiques actuelles

Comme énoncé en section 1.2, en ce qui concerne les gaz du sol, en France, tant dans des ouvrages temporaires de type canne gaz que des ouvrages permanents (piézairs), ou pour les ouvrages sous dalle (sub-slab), leur caractérisation quantitative est classiquement réalisée par la mise en œuvre de prélèvements dynamiques sur des supports adsorbants, et plus occasionnellement par aspiration naturelle (Canister®), avec des prélèvements d'une durée de quelques heures, 24 heures au maximum pour ce dernier dispositif.

Actuellement, pour la caractérisation des gaz du sol, la mise en œuvre des échantillonneurs passifs fait plutôt exception dans le domaine des sites et sols pollués, et est encore très limitée, alors que cela n'est pas le cas dans les études de qualité de l'air intérieur comme précédemment abordé. Actuellement, seuls quelques bureaux d'études américains implantés en France proposent dans certaines de leurs études la mise en œuvre des échantillonneurs passifs dans des trous de sondage de sub-surface non équipés, de faible diamètre (suffisant pour la mise en place des EP) et obturés par un bouchon étanche, pour la caractérisation qualitative dans le cadre d'études de screening de panache de pollution dans les gaz du sol.

Plus particulièrement développée aux Etats-Unis, pour les gaz du sol, la technique d'échantillonnage passif est reconnue dans les référentiels de l'US EPA (1997 ; 1958 ; 1998a ; 1998b), l'ASTM (2016). Face à l'essor de ces supports et plus généralement de l'échantillonnage passif, une norme ASTM D7758 :11, a été publiée aux Etats-Unis en 2011, afin d'encadrer les pratiques. Les techniques passives décrites dans cette norme sont dédiées au prélèvement des gaz du sol. Ce document met en avant la simplicité d'utilisation et le faible coût des échantillonneurs passifs. Ces deux aspects permettent la réalisation d'un nombre important de prélèvements. Cependant, il est important de souligner que la norme ASTM D7758 :11 considère que les données obtenues grâce aux échantillonneurs passifs sont semi-quantitatives. Par ailleurs, cette technique est avant tout présentée comme un outil de « screening » pour les gaz du sol, permettant la cartographie détaillée de la contamination d'un site, dans le but d'identifier la ou les zones « source » et de délimiter le panache gazeux de pollution.

En rappel de la littérature, l'échantillonnage passif est une technique en plein essor depuis un certain nombre d'années maintenant, mais plus particulièrement pour l'air intérieur et extérieur, milieux pour lesquels ils sont éprouvés, aux Etats-Unis (McAlary, 2016 ; etc.), en Europe ou en France comme mentionné dans PassSolAir (ADEME, INERIS, 2017). Ils sont également repris dans le rapport relatif à la 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 (BRGM-INERIS, 2016).

Ainsi, en France, actuellement, c'est principalement pour l'air intérieur, que des dispositifs de prélèvement passif de type adsorbant « Radiello » avec corps diffusif sur un socle ou badge sont habituellement utilisés uniquement dans les domaines de la qualité de l'air intérieur (ERP²², pressing, habitations à proximité de pressing (INERIS, 2012), etc.) pour l'évaluation des expositions des populations et de l'exposition des travailleurs. Ils sont, également, par exemple, de plus en plus utilisés par les associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA²³) pour cartographier les niveaux de pollution dans des zones comprenant une répartition complexe des polluants. Dans ce cas, les principales substances recherchées sont le dioxyde d'azote (NO₂), l'ozone (O₃) et le dioxyde de soufre (SO₂)²⁴. Les échantillonneurs passifs sont également utilisés pour caractériser et quantifier les substances chimiques émises par les produits et appareils ménagers présents dans l'air intérieur, et ce, dans tout type de bâtiments (habitations, bureaux, bâtiment d'enseignement, etc.). Parmi les substances les plus classiquement ciblées dans le cadre de campagne de prélèvement passif, figurent principalement les composés organiques volatils, notamment les BTEX et les composés carbonylés (formaldéhyde, acétaldéhyde). L'INERIS, dans le cadre du LCSQA²⁵ a mené différentes études, en chambre à atmosphère contrôlée et sur site pilote, pour l'évaluation des performances des échantillonneurs passifs disponibles pour le prélèvement du benzène, du formaldéhyde et de l'acétaldéhyde en air intérieur et air extérieur (LCSQA, 2004 ; INERIS, 2004a ; INERIS, 2004b ; LSCQA, 2008). Parmi les échantillonneurs intégratifs utilisés, figurent les dispositifs passifs à diffusion radiale Radiello® et les tubes DSD-DNPH®. Les durées de prélèvement peuvent être adaptées jusqu'à 4 ou 5 jours en fonction de la

²² Etablissements Recevant du Public

²³ Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air

²⁴ Liste non exhaustive, d'autres polluants, non mentionnés ici, font également l'objet de prélèvement passif dans le domaine de la qualité de l'air atmosphérique. Les substances sont mentionnées à titre d'exemple.

²⁵ Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air

situation rencontrée (réglementation, cas de l'étude, niveaux de concentration attendus, composés ciblés, limites de quantification recherchées, etc.).

Cependant, les substances prioritairement recherchées dans le cadre de prélèvements mis en œuvre dans le domaine de la qualité de l'air (air intérieur, air atmosphérique) et dans le domaine des sites et sols pollués (air intérieur, gaz du sol) peuvent différer quelque peu, notamment en termes de diversités des substances, de gammes de concentrations rencontrées et également de conditions environnementales.

2.2 Caractéristiques générales des échantillonneurs passifs

Les échantillonneurs passifs (EP) « intégratifs » permettent un prélèvement intégré des composés pendant toute la durée d'exposition. Selon les propriétés de l'échantillonneur passif « intégratif » considéré, les milieux étudiés peuvent être multiples : eau, air intérieur/extérieur, gaz du sol, gaz sous la dalle de bâtiment (sub-slab).

Un échantillonneur passif est constitué schématiquement des principaux éléments suivants :

- **un ou des adsorbants** 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 l'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 pas d'une tête de diffusion, un corps diffusif (corps poreux cylindrique). 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. Au regard des taux d'humidité élevés dans les gaz du sol, cette caractéristique doit être soulignée. Par exemple, la Figure 4 compare les effets de l'humidité relative pour l'échantillonneur passif SPG-0008 de la société AGI avec un système d'adsorbant utilisé multi-polymère breveté et un adsorbant carboné. Quant à la Figure 5, elle présente des résultats pour le toluène. L'adsorption de masse est relativement constante pour des humidités relatives comprises entre 0% et 95% ;
- **une tête de diffusion** surmontant le vial en verre ou le tube en acier, qui a comme premier effet de couper l'effet du vent. A titre informatif, les tests réalisés par les fabricants pour l'évaluation des taux d'échantillonnage sont mis en œuvre dans des enceintes ou des chambres avec des vitesses d'air nulles, ainsi toutes modifications de ces conditions peuvent conduire à utiliser des taux d'échantillonnage non appropriés. Cependant, il est à souligner que dans le cas d'une utilisation pour la caractérisation des gaz du sol via un ouvrage temporaire ou permanent, la vitesse de l'air est nulle ou quasi nulle, induisant un impact minime de la présence ou absence de la tête de diffusion.

Comme explicité ci-après en termes de fonctionnement général des échantillonneurs passifs, la diffusion est régie par le gradient de concentration (1^{ère} loi de Fick) considérant que l'air stagne.

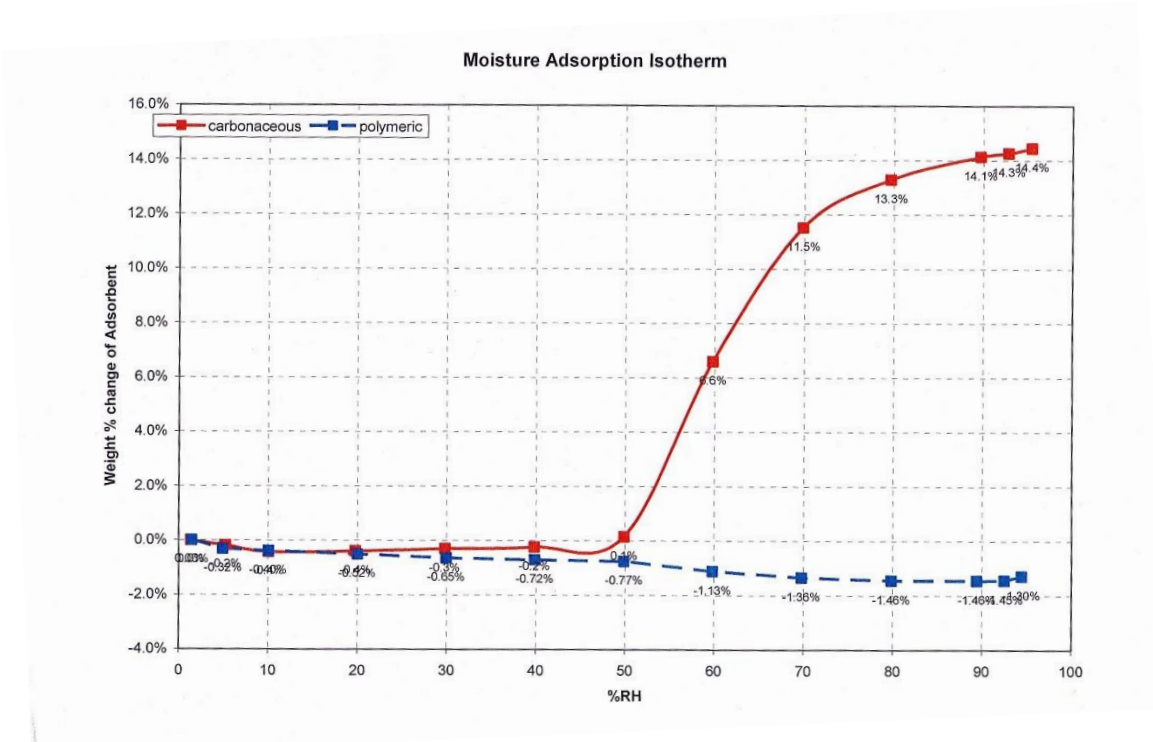


FIGURE 4 - COMPARAISON DE L'EFFET DE L'HUMIDITE RELATIVE SUR L'ADSORBANT DE L'ECHANTILLONNEUR SPG-0008 PROPOSE PAR AGI ET UN ADSORBANT CARBONE (SOURCE AGI)

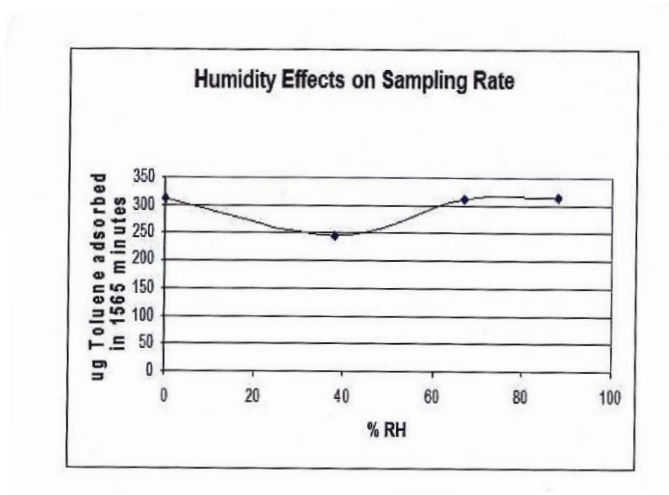


FIGURE 5 - EFFET DE L'HUMIDITE RELATIVE SUR L'ADSORBANT DE L'ECHANTILLONNEUR SPG-0008 PROPOSE PAR AGI POUR LE TOLUENE (SOURCE AGI)

Par convention, les dispositifs sont classés en deux types qui varient l'un de l'autre par le type de désorption appliquée pour récupérer les polluants piégés, leur désorption se faisant avec un solvant ou par désorption thermique.

Les échantillonneurs passifs varient également de par leur géométrie.

Historiquement en termes de principe de fonctionnement au regard de leur géométrie, sont distingués principalement les échantillonneurs passifs intégratifs radiaux et intégratifs axiaux²⁶ comme illustré sur la Figure 6 :

- l'échantillonneur passif intégratif radial : les substances étudiées présentes dans la matrice environnementale échantillonnée, sont mises au contact du support adsorbant selon un 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 ;
- l'échantillonneur passif intégratif axial : les substances ciblées et présentes dans le milieu dans la matrice environnementale, sont mises au contact du support adsorbant selon un axe « axial ». 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.

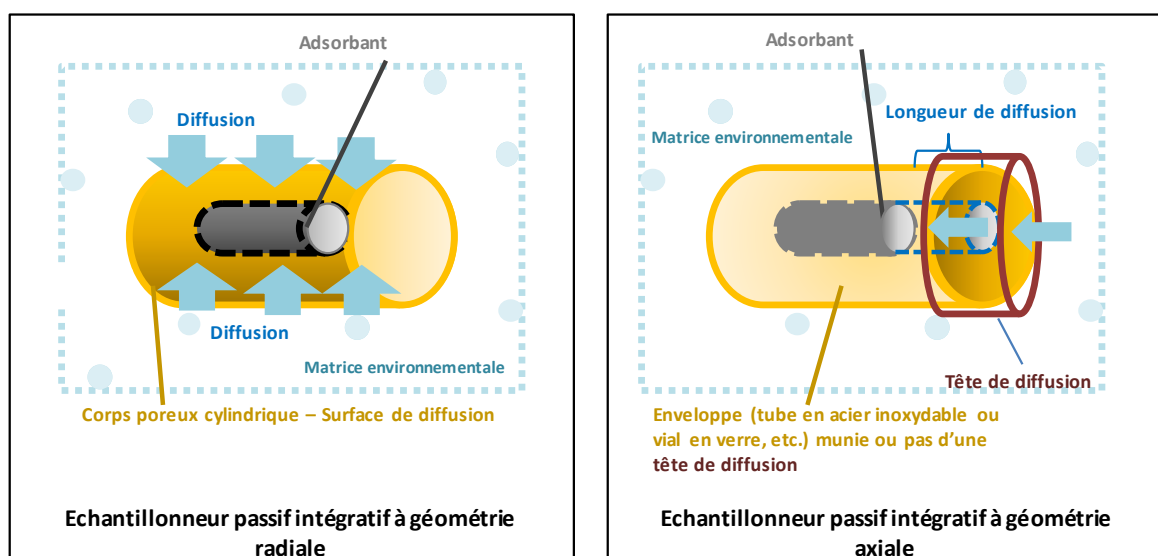


FIGURE 6 - SCHEMAS DE PRINCIPE DES ECHANTILLONNEURS A GEOMETRIE RADIALE ET AXIALE (SOURCE INERIS)

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.

Classiquement, un dispositif à géométrie radiale présentera un taux d'échantillonnage²⁷ supérieur à celui d'un dispositif à géométrie axiale et mieux adapté pour des prélèvements de courtes durées.

Alors que le taux d'échantillonnage axial s'accroît de manière linéaire avec l'augmentation du rapport surface/parcours diffusif, celui de l'échantillonneur radial change de manière exponentielle.

Il est à souligner que les EP proposés par les sociétés BEACON Environmental Services et Amplified Geological Imaging (AGI), respectivement le BeSure® Sampler, et les SPG-0008 et TIPS, associent des trajets de diffusion axiaux et radiaux dont la prédominance dépendra également des durées d'exposition.

La Figure 7 présente une matrice en termes de caractéristiques des échantillonneurs passifs.

²⁶ Dans le cadre de ce projet concernant la caractérisation des gaz du sol, n'est pas mentionné l'échantillonneur de type badge.

²⁷ Il est à souligner qu'en fonction des auteurs, les termes taux d'échantillonnage, taux de prélèvement, débit de diffusion, débit de prélèvement, vitesse de prélèvement sont utilisés pour mentionner le même paramètre, exprimé en ml/min. Ainsi, dans la suite du document, seul le terme taux d'échantillonnage sera utilisé.

Sampler Type	Uptake Rate	Sampling Duration	Analytical Sensitivity	Target Compounds
Tube (Axial)	Lower	Longer	Lower	Depends on the selected sorbent
Radial	Higher	Shorter	Higher	VOCs & SVOCs

FIGURE 7 - MATRICE POUR LES ECHANTILLONNEURS PASSIFS (D'APRES NAVFAC, 2016 : SOURCE : ADAPTE DE L'EPA, 2016)

2.3 Fonctionnement général des échantillonneurs passifs basé sur la diffusion

La membrane poreuse pour les EP « radiaux » ou la tête de diffusion pour les EP « axiaux » (selon le cas) régit la diffusion²⁸ et la perméation²⁹ des composés du milieu vers le support adsorbant. Le prélèvement passif est fondé sur le principe physique de la diffusion moléculaire, lui-même régi par la loi de Fick.

Dans un premier temps, la diffusion est régie par le gradient de concentration (1^{ère} loi de Fick) : les composés migrent spontanément vers des zones à plus faible concentration et pénètrent donc à l'intérieur de l'échantillonneur. Les composés sont ensuite adsorbés sur le support adsorbant, et « s'accumulent » en continu au sein de l'échantillonneur passif. Quel que soit l'échantillonneur retenu, l'adsorbant est caractérisé par une très grande surface spécifique et une très grande affinité pour les composés ciblés. L'adsorption des composés est donc « systématique », dans la mesure où le temps d'exposition et la gamme de concentrations n'entraînent pas une saturation de l'adsorbant (disponibilité des sites d'adsorption). Comme les composés à l'intérieur de l'échantillonneur passif sont adsorbés, le gradient de concentration de part et d'autre de la membrane ou de la tête de diffusion, est maximal pendant toute la durée d'exposition (Figure 8). L'équilibre thermodynamique n'est donc jamais atteint et le transfert des composés à travers la membrane est continu. Les échantillonneurs passifs intégratifs sont donc caractérisés par un régime de prélèvement cinétique.

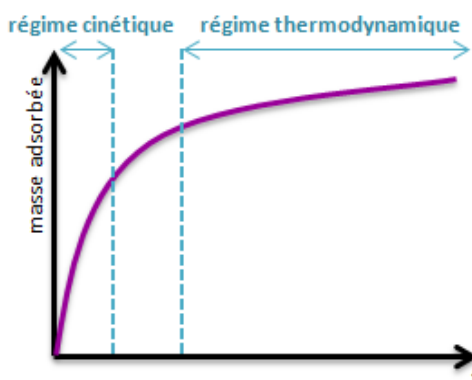


FIGURE 8 - ECHANTILLONNEURS PASSIFS INTEGRATIFS ET REGIME CINETIQUE (SOURCE : INERIS)

En fonction du coefficient de diffusion du composé considéré et des caractéristiques géométriques de l'EP (longueur et surface de diffusion), des propriétés de la membrane/de la tête de diffusion (épaisseur, taille des pores, surface filtrante...) mais aussi des propriétés de l'adsorbant, le taux d'échantillonnage varie pour chaque composé.

²⁸ tendance naturelle d'un système à rendre homogènes les concentrations des substances chimiques en son sein

²⁹ écoulement d'un fluide au travers d'une membrane

Ce taux d'échantillonnage est fonction des propriétés de l'échantillonneur passif mais également des propriétés des substances échantillonnées et des conditions du milieu. Il est déterminé par le constructeur du dispositif grâce à des tests en laboratoire (dans des enceintes ou chambres contrôlées) pour des conditions opératoires bien précises (milieu de prélèvement, gamme de concentration, température, etc.) et fourni ou pas à l'utilisateur lors de la commercialisation, comme repris par la suite dans la section 2.6.1 décrivant chaque EP.

Les échantillonneurs passifs intégratifs permettent l'obtention d'une masse et/ou une concentration moyenne des composés pour une durée d'exposition donnée (Figure 9). Elle peut être intéressante lorsque les niveaux de concentration fluctuent dans le temps.

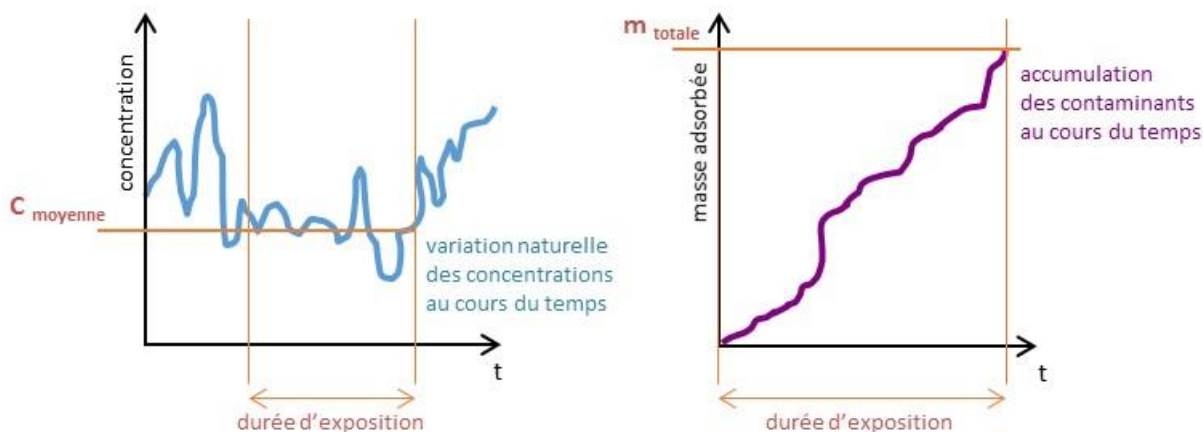


FIGURE 9 - CONCENTRATION MOYENNE DES COMPOSÉS PENDANT LA DURÉE D'EXPOSITION (SOURCE : INERIS)

Afin de minimiser l'influence de la mise en place et du retrait de l'échantillonneur passif dans le milieu d'exposition, il est conseillé d'effectuer le prélèvement sur une durée suffisamment longue³⁰, tenant compte de la capacité de l'adsorbant ainsi que du niveau de concentration des composés dans le milieu. En effet, il est important de veiller à ce que l'adsorbant utilisé soit adapté aux niveaux de concentrations des composés sur la zone investiguée afin de ne jamais saturer l'adsorbant (régime thermodynamique), auquel cas, la masse de composé adsorbée ne pourra pas être convertie en concentration. Seule une donnée qualitative (exprimée en masse) pourra être exploitée.

2.4 Facteurs d'influence sur le taux d'échantillonnage

Le taux d'échantillonnage, est classiquement exprimé comme suit, et est déterminé expérimentalement par le constructeur, pour certaines conditions, via des essais en chambre à atmosphère contrôlée pour chaque composé chimique :

$$\tau_{\text{échantillonnage}} = D_{\text{air}} \frac{A}{L} \quad \text{ÉQUATION 1}$$

avec

$\tau_{\text{échantillonnage}}$	taux d'échantillonnage de la substance (mL/min)
A	surface d'échantillonnage (cm ²)
L	longueur de diffusion (cm)
D	coefficient de diffusion de la substance (cm ² /min)

³⁰ la durée optimale dépend essentiellement du type d'EP et des gammes de concentrations des composés présents

Le paramètre principal d'un EP est le taux d'échantillonnage, qui représente la quantité de matière adsorbée en fonction du temps. Ce paramètre varie notamment avec :

- le composé et l'adsorbant (sous forme d'affinité),
- la géométrie de l'EP,
- la concentration,
- la présence d'autres polluants,
- la température ambiante lors du prélèvement. Celui-ci étant réalisé par adsorption physique, une augmentation de la température rend le piégeage moins efficace. Si la température moyenne lors de l'exposition est trop différente de 25°C, une correction peut être effectuée lors du calcul de la concentration à partir de la masse de produit analysée,
- l'humidité,
- la vitesse faciale d'air ou la vitesse du vent,
- la rétrodiffusion.

La détermination du taux d'échantillonnage doit inclure systématiquement l'étude de l'impact de ces paramètres. Cette dernière permet de définir le domaine d'application et d'utilisation du dispositif. L'utilisateur doit vérifier que les conditions d'utilisation de l'EP choisi sont compatibles avec ce domaine d'application.

Quand ces paramètres sont inhabituels ou très variables, la précision des échantillonneurs passifs peut être influencée (Tolnai et al., 2000). Ainsi, lorsque les conditions d'échantillonnage sont typiques de l'air intérieur (température voisine de 21°C, humidité modérée et douce circulation de l'air), les fabricants ont des taux d'échantillonnage publiés pour un composé particulier et un couple échantillonneur / adsorbant.

La pression et la température influencent tant le phénomène de diffusion moléculaire que les phénomènes d'adsorption.

Le taux d'échantillonnage variant avec la température, les fabricants des EP mentionnent les formulations de la correction à effectuer sur le débit.

En ce qui concerne la rétrodiffusion, au regard de l'une des hypothèses de base qui est l'utilisation d'un adsorbant qui collecte avec une efficacité totale les substances et qui ne les relâche pas après adsorption, il est à souligner l'élément suivant mentionné par la société AGI dans le cadre du projet : « *La rétrodiffusion ou la diffusion inverse est une préoccupation si les adsorbants utilisés ne possèdent pas une capacité suffisante pour les composés étudiés et devient un problème à mesure que les niveaux de masse augmentent et que l'adsorbant se rapproche de la saturation. Nous évitons ce problème en fonctionnant dans la gamme linéaire (masse faible), où la diffusion inverse n'est pas un problème* ».

2.5 Expression des résultats en masse et conversion en concentration

En fonction des échantillonneurs passifs utilisés, le fabricant ou le laboratoire d'analyse fournira des résultats en masse (résultat qualitatif), et également convertis en concentration (résultat quantitatif). La connaissance précise du taux d'échantillonnage et la vérification de son domaine d'utilisation dans les conditions définies par le constructeur sont nécessaires pour assurer la qualité du résultat en concentration. En outre, dans le cas des EP de AGI comme explicité ci-après, dans le cas de la conversion des résultats de la masse en concentration pour les gaz du sol, un facteur d'ajustement du taux d'échantillonnage est utilisé pour tenir compte de la résistance à la diffusion accrue, due à la présence de sol et d'eau, nécessitant la connaissance de paramètres complémentaires, des caractéristiques des sols.

En préambule, il est à rappeler que dans un document de 2016 de l'US EPA, il est mentionné que « *les échantillonneurs passifs Sorber® ou Modules Gore® de Amplified Geochemical Imaging (AGI), BeSure Sampler de BEACON Environmental Services sont des dispositifs semi-quantitatifs, quantifiant des masses, mais dont les taux d'échantillonnage sont incertains, conduisant ainsi à concentrations moins certaines* » (Hodny et al, 2009 ; Odenrantz and O'Neill, 2009).

Pour l'air en termes de mesure quantitative, d'une manière générale, le calcul de la conversion des résultats exprimés en masse adsorbée tient compte d'une durée d'exposition de l'échantillonneur passif et du taux d'échantillonnage du composé et est le suivant pour tous les EP utilisés dans le projet :

$$C = \frac{m_{\text{adsorbée}}}{t_{\text{exposition}} \times \tau_{\text{échantillonnage}}} \quad \text{ÉQUATION 2}$$

avec

C	concentration de la substance (mg/m ³)
m _{adsorbée}	masse de la substance adsorbée sur le support pendant l'exposition (ng)
t _{exposition}	durée d'exposition du support passif (min)
τ _{échantillonnage}	taux d'échantillonnage de la substance (mL/min)

Pour les gaz du sol, la formulation de la conversion dépend de l'EP utilisé, ainsi plus particulièrement, dans le cas du :

- « EP tube avec chromosorb 106 - BEACON » commercialisé par BEACON, cette société a calculé dans le cadre de ce projet, les résultats en concentration des prélèvements de gaz du sol avec l'Équation 2 ;
- « EP tube avec Radiello 145 » conditionné par l'INERIS (développement interne), les résultats en concentration des prélèvements de gaz du sol sont également donnés par le biais de l'Équation 2 ;
- « EP SPG-0008 - AGI » (commercialisé) et du « EP TIPS - AGI » (en cours de développement) de la société AGI Surveys®, le calcul de la conversion des résultats exprimés en masse adsorbée en concentration est différent, tenant compte d'un facteur d'ajustement, comme repris dans les Équation 3 et Équation 4 :

$$C_{\text{gaz du sol}} = \frac{C}{E} \quad \text{ÉQUATION 3}$$

avec

$$C = \frac{m_{\text{adsorbée}}}{t_{\text{exposition}} \times \tau_{\text{échantillonnage}}} \quad \text{et} \quad E = \frac{D_{\text{eff}}}{D_{\text{air}}} = \theta^{4/3} (1 - \varepsilon)^{10/3} \quad \text{ÉQUATION 4}$$

C _{gaz du sol}	concentration de la substance dans les gaz du sol (mg/m ³)
C	concentration de la substance (mg/m ³)
E	« Soil Effectiveness Factor » comme nommé par AGI et traduit dans ce rapport par « facteur d'influence du sol » [-]
m _{adsorbée}	masse de la substance adsorbée sur le support pendant l'exposition (ng)
t _{exposition}	durée d'exposition du support passif (min)
τ _{échantillonnage}	taux d'échantillonnage de la substance (mL/min)
D _{eff}	coefficient de diffusion effectif dans le sol [L ² /T]
D _{air}	coefficient de diffusion de la substance dans l'air [L ² /T]
θ	porosité totale du sol [L ³ _{pores} /L ³ _{sol}]
ε	« water filled porosity », avec comme traduction choisie dans ce rapport « teneur volumique en eau » ³¹ [L ³ _{eau} /L ³ _{sol}]

³¹ Il est à préciser que la « water filled porosity » [m³/m³] est égale au produit de la teneur massique en eau [m³/kg] et de la masse volumique apparente du sol [kg/m³]. Cela conduit au regard de certains documents bibliographiques à assimiler le terme « water filled porosity » à la teneur volumique en eau.

Ainsi, dans ce cas, le facteur différenciant le cas de l'air et celui des gaz du sol est le paramètre nommé par AGI (Hodny et al, 2009 ; AGI, 2014 et 2015) « Soil Effectiveness Factor » permettant d'ajuster le taux d'échantillonnage dans le cas des sols jusqu'à 40% à 10% de celui de l'air (AGI, 2014).

En effet, lorsque les EP de AGI sont placés dans l'air, l'air est constamment renouvelé à la surface de l'EP, où il diffuse à travers la membrane en quelques secondes et est adsorbé sur l'adsorbant hydrophobe spécialement conçu. Cependant dans le cas des gaz du sol, la matrice constituée de particules de sols et d'eau crée une résistance à la diffusion des gaz du sol accrue, ce qui ralentit le réapprovisionnement en gaz à la surface de l'EP. Cette résistance peut être approchée par les équations de Millington & Quirk (Millington, 1959 ; Millington & Quirk, 1961, reprises également dans Johnson & Ettinger, 1991)³².

En ce qui concerne les paramètres environnementaux précités, nécessaires à la conversion de la masse en concentration, que sont la porosité totale du sol et la « water filled porosity – ou teneur volumique en eau » du sol, ils peuvent être renseignés par l'opérateur comme suit à la société AGI. Les valeurs de ces paramètres seront basées, soit sur des mesures réalisées en laboratoire à partir d'échantillons prélevés sur site, soit issues de calculs ou de la littérature, et en particulier du système de classification des sols SCS³³ permettant de déterminer la texture en fonction de la granulométrie et de définir des valeurs des paramètres par défaut pour chaque texture suite à la consultation de bases de données comme celle reprise dans US EPA (2003). Ainsi, plus particulièrement :

- la valeur de la porosité totale peut être issue soit de mesures en laboratoire sur des échantillons de sol prélevés lors de diagnostics du site ou issue de la bibliographie, comme par exemple, le tableau disponible dans le document intitulé Johnson & Ettinger modeling equation inputs (US EPA, 2003) utilisé par la société AGI, avec une valeur par défaut correspondant à une lithologie de sol telle que décrite dans la classification SCS. La caractérisation de la lithologie est établie soit uniquement sur des observations visuelles d'échantillons de sol du site par l'opérateur ou sur la base d'une analyse granulométrique en laboratoire et de l'utilisation de la classification SCS ;
- la valeur de la « water filled porosity – ou teneur volumique en eau » est soit une valeur calculée sur la base de la mesure en laboratoire sur des échantillons de sol prélevés lors de diagnostic du site de la teneur massique en eau³⁴ et également de la connaissance de la masse volumique apparente du sol³⁵, soit une valeur également mentionnée dans le tableau précité du document de l'US EPA (2003), comportant des valeurs par défaut pour les différentes lithologies reprises dans la classification SCS, au regard de celle concernée par la zone de prélèvement des gaz du sol.

En l'absence de données précitées, mesurées sur site ou au regard de leur variabilité temporelle, devant l'ensemble des incertitudes amenées, il n'est pas recommandé de tenir compte de ces résultats exprimés en concentration comme quantitatifs, ou sinon de leur intégrer les incertitudes.

La société AGI illustre dans une de ses publications³⁶, la variabilité du facteur E « *Soil Effectiveness factor - facteur d'influence du sol* » en fonction de la porosité totale du sol et de la « water filled porosity – ou teneur volumique en eau » du sol, reprise dans la Figure 10, montrant pour ce facteur, une gamme de valeurs allant d'une valeur très faible de 0,005 à 0,4.

³² Pour rappel, d'un modèle très fréquemment utilisé pour les transports en milieux poreux, les coefficients de diffusion effectifs, dans l'air ou dans l'eau du sol, sont déterminés suivant le modèle de Millington & Quirk [1961], qui établit une relation à partir du coefficient de diffusion de la substance volatile pure dans l'air ou dans l'eau, de la porosité totale du sol, et de la porosité ouverte à l'air ou et de la porosité ouverte à l'eau du sol.

³³ SCS : soil classification system : le système de classification des sols le plus couramment utilisé en Amérique du nord.

³⁴ Ainsi, il est à souligner que dans le cas du projet TEMPAIR, les valeurs utilisées étaient issues de mesures en laboratoire sur des échantillons de sol prélevés lors des diagnostics réalisés dans le cadre du projet Fluxobat, avec la norme NF ISO11465, soit une mesure de la teneur massique en eau.

³⁵ En effet, comme indiqué précédemment, la « water filled porosity – ou teneur volumique en eau » [m^3/m^3] est égale au produit de la teneur massique en eau [m^3/kg] et de la masse volumique apparente du sol [kg/m^3].

³⁶ Summary of sampling rate calibration for Gore SPG-0008 modules in gas phase. Document de AGI SPG-SOP-0495 R3 transmis avec les bordereaux d'analyse et AGI, 2009).

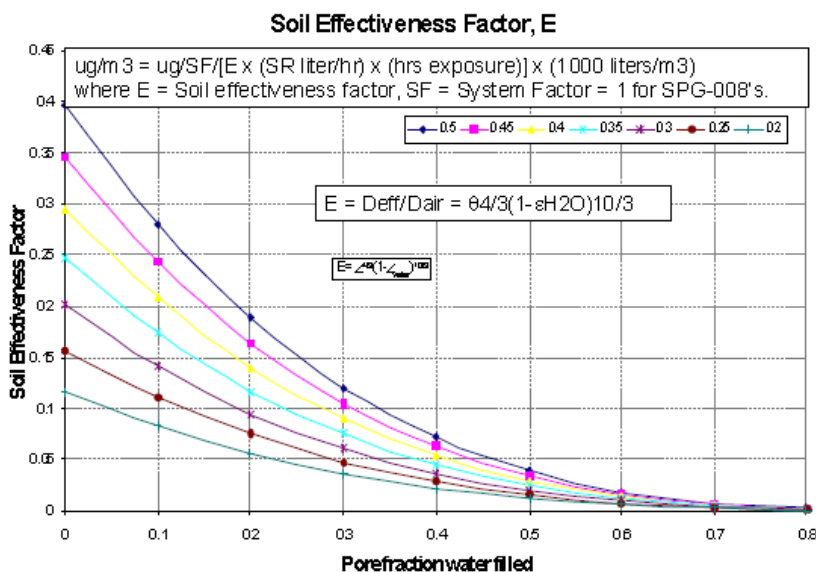


FIGURE 10 - VARIATION DU FACTEUR E « SOIL EFFECTIVENESS - FACTEUR D'INFLUENCE DU SOL » (SOURCE AGI)

En termes d'incertitudes associées à l'étape de conversion des résultats de la masse en concentration, il est à souligner également les points suivants.

Lors d'échanges avec la société AGI, dans le cadre de ce projet, des exemples de pourcentages d'erreur ont été communiqués dans le cas d'absence de données spécifiques au site et le recours aux valeurs par défaut de la littérature (US EPA, 2003) sur la base d'une description lithologique. Ainsi, par exemple, dans le cas d'un type de sol correctement sélectionné, au regard des gammes disponibles de valeurs de la porosité totale, dans le cas d'un sol silteux ou d'un sol sableux, l'erreur sera fonction des gammes de valeurs de la « water filled porosity – ou teneur volumique en eau », conduisant respectivement à des erreurs de 84% ou de 1% ; AGI mentionnant également des exemples de gammes d'erreurs associées à différentes lithologies, variant de 1% à 94%.

Par ailleurs, au regard de l'utilisation des EP de la société AGI au sein d'ouvrage permanent de type piézair, et des échanges conduits avec cette société, cette dernière a indiqué que classiquement aux EU, le « EP SPG-0008 - AGI » n'était pas utilisé dans ce type d'ouvrage. Elle a souligné que la présence des fentes de la crépine des ouvrages constitue une zone d'écoulement réduit de gaz pouvant avoir un impact sur le calcul de la concentration. Celui-ci dépendra du volume interne, de l'épaisseur du tubage, et de l'épaisseur de la fente et de la longueur. Dans le cas du projet PassSolAir (ADEME, INERIS, 2017), il avait été mentionné dans le cas d'un ouvrage d'une longueur total de 130 cm ou 70 cm, un facteur de réduction des concentrations de l'ordre respectivement de 0,53 et 0,68, mais variable en fonction des substances.

En outre, dans le cadre du projet PassSolAir, la société AGI avait mentionné les éléments suivants : « Dans un ouvrage permanent ou semi-permanent avec des concentrations significativement élevées, un temps d'exposition très court est nécessaire. En fonction du volume d'air dans l'ouvrage permanent et du taux d'échantillonnage de l'EP, la représentativité de la mesure de l'EP sera celle du volume d'air contenu dans l'ouvrage et aucune correction du sol n'est nécessaire. Ce scénario est rare, mais dans votre cas, vous avez un site extrêmement contaminé, qui nécessite des temps d'exposition courts. Cette situation peut ne pas être le cas dans d'autres sites où les concentrations de contaminants peuvent varier largement. »

Il est à souligner que pour le projet TEMPAIR, le choix de piézairs avec des gammes de concentrations plus faibles a été privilégié afin de tester des durées de prélèvements plus importantes.

Remarque :

Il est à souligner que la société BEACON Environmental Services qui commercialise également un EP pour les gaz du sol, le « EP BeSure Sampler - BEACON », ne transmet que des résultats en masse, au regard des incertitudes associées à cette quantification (Hodny et al, 2009 ; Odencrantz et O'Neill, 2009). Par ailleurs, en ce qui concerne l'échantillonneur passif Emflux® de l'entreprise Quadrel, dont la technologie a été reprise par l'entreprise américaine BEACON Environmental Services, Inc., qui proposait également la conversion des

données qualitatives (masses) en données quantitatives (concentrations), les concentrations obtenues n'étaient pas comparables aux concentrations obtenues par la technique de référence (cité dans US EPA, 1998).

Quant à la société SiREM au Canada qui commercialise l'échantillonneur passif Waterloo, elle mentionne des résultats en concentration avec une formulation identique à celle mentionnée ci-dessus pour le milieu air, l'Équation 2.

2.6 Description des échantillonneurs passifs mis en œuvre pour les gaz du sol

2.6.1 Description des échantillonneurs passifs pour les gaz du sol

La revue de la littérature initiée dans le projet PassSolAir (ADEME, INERIS, 2017) puis poursuivie dans le cadre de TEMPAIR, a principalement porté sur les EP pour la caractérisation des gaz du sol. Elle concerne :

- le BeSure® Sampler commercialisé par l'entreprise BEACON Environmental Services Inc., (« *EP BeSure Sampler - BEACON* »),
- le SPG-0008 commercialisé par l'entreprise Amplified Geochemical Imaging, LLC (AGI), (« *EP SPG-0008 - AGI* »),
- le TIPS, en cours de développement par l'entreprise Amplified Geochemical Imaging, LLC (AGI), (« *EP TIPS - AGI* »),
- le tube en acier inox avec un adsorbant chromosorb 106 et avec une tête de diffusion (depuis 08/2015) commercialisé par l'entreprise BEACON Environmental Services Inc., (« *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* »),
- le tube en acier inox avec un adsorbant Radiello 145 et avec une tête de diffusion conditionné par l'INERIS (un développement interne), (« *EP tube avec Radiello 145* »).

Une synthèse des caractéristiques de ces EP est ensuite présentée.

2.6.1.1 L'échantillonneur passif BeSure® Sampler commercialisé par l'entreprise BEACON Environmental Services Inc.

Historiquement, en 1989, le premier échantillonneur passif, vial inerte surmonté d'une tête de diffusion et contenant plusieurs cartouches d'adsorbant hydrophobe, développé aux Etats Unis, par l'entreprise Quadrel et dénommé Emflux®, a fait l'objet d'une étude de l'US EPA, au travers du programme « *Environmental Technology Verification* »³⁷ (US EPA, 1998), pour la caractérisation qualitative des eaux souterraines. Il est également proposé pour le prélèvement des gaz du sol, mis en œuvre dans des trous de sondage de sub-surface et obturés par un bouchon étanche, ou dans des piézaires, et de l'air intérieur. Quelques années plus tard, la technologie de l'échantillonneur passif Emflux® a été reprise par l'entreprise américaine BEACON Environmental Services, Inc. L'échantillonneur passif a alors fait l'objet de certaines améliorations, notamment concernant la qualité des adsorbants utilisés. L'échantillonneur passif a été renommé PSG Sampler puis BeSure® Sampler (nom commercial actuel).

En termes de description technique, l'échantillonneur « *EP BeSure Sampler - BEACON* » est composé d'un vial en verre muni d'un capuchon grillagé lors de la phase d'exposition, contenant deux cartouches de deux adsorbants (voir photographie du Tableau 3). La composition de ces adsorbants n'est pas divulguée par l'entreprise puisque brevetée. Cependant, il est indiqué que l'un de ces adsorbants est un adsorbant développé pour l'échantillonnage des composés très volatils (chlorure de vinyle, 1,1-dichloroéthène...) alors que l'autre est développé pour les composés volatils (PCE, TCE...), et que ces adsorbants sont hydrophobes ; ils peuvent donc être utilisés pour des prélèvements en milieu humide.

Les composés échantillonnés au regard des caractéristiques des deux adsorbants développés, sont parmi une très large gamme de substances, plus de 150, allant des composés semi-volatils aux composés halogénés volatils, les fractions TPH (Total Petroleum Hydrocarbons) et également des agents toxiques de guerre (comme le gaz moutarde, le gaz Sarin, etc.). Le mercure, peut également faire l'objet d'un prélèvement, au moyen d'un adsorbant spécifiquement développé par l'entreprise.

³⁷ Programme de l'US EPA s'attachant à vérifier les performances d'outils innovants et pertinents dans leur domaine et de promouvoir leur essor.

Les applications proposées par BEACON Environmental Services, Inc. pour le « *EP BeSure Sampler - BEACON* » sont :

- l'étude de screening ;
- la caractérisation des milieux et diagnostic (localisation et délimitation de la source de pollution et de son panache) ;
- l'identification de voies de transfert préférentielles dans la cadre d'études en lien avec l'évaluation des risques sanitaires ;
- la détection des émissions de conduites et installations de process ;
- le suivi des travaux de dépollution et suivi à long terme ;
- l'identification de rejets historiques (solvants, carburants, agents chimiques de guerre et leurs dérivés).

D'une manière plus générale, la société recommande l'utilisation du « *EP BeSure Sampler - BEACON* » pour sa facilité de mise en œuvre du prélèvement sur site³⁸, la possibilité de réaliser les prélèvements sans perturber l'activité usuelle du site, la mise en œuvre d'un grand nombre de prélèvements (en particulier dans le cas de sites de grande superficie), ainsi que la grande variété de composés ciblés.

L'Annexe 1 illustre des exemples de mise en place du « *EP BeSure Sampler - BEACON* » pour les gaz du sol dans un ouvrage non tubé et un ouvrage tubé, extraits de références.

Les données fournies sont des données massiques et restent donc qualitatives. 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.

Les gammes de masse de substance adsorbée/module et les durées des prélèvements (hormis la mention générale de durées d'exposition classique de 3 à 14 jours) ne sont pas systématiquement mentionnées dans les documents de BEACON Environmental Services Inc.

Différents cas d'études, dans le cadre desquels le « *EP BeSure Sampler - BEACON* » a été utilisé, sont présentés par BEACON Environmental Services Inc. (BEACON). En termes de retours d'expérience, des documents sont disponibles sur le site internet de l'entreprise BEACON Environmental Services Inc. (<http://www.beacon-usa.com/>) avec quelques références reprises en section 6.

2.6.1.2 L'échantillonneur passif SPG-0008 (commercialisé) de l'entreprise Amplified Geochemical Imaging LLC (AGI)

En 1992, un échantillonneur passif intégratif, le SPG-0008 est développé et breveté par l'entreprise américaine W.L. Gore & Inc.³⁹ : le Gore Sorber®. En 1998, l'US EPA, au travers de son programme « *Environmental Technology Verification* » déjà cité dans la section ci-dessus relative au Besure Sampler, a également réalisé une première étude, sur cet échantillonneur passif, en tant qu'échantillonneur passif dédié au screening des gaz du sol (US EPA, 1998). Les différents tests mis en œuvre par l'US EPA, ont permis de démontrer les performances de l'échantillonneur passif, notamment dans des sols argileux et sableux.

Depuis lors, l'entreprise W.L. Gore & Inc. devenue Amplified Geochemical Imaging, LLC (AGI), travaille à l'amélioration de cet échantillonneur passif, dans le but d'acquérir une meilleure maîtrise de l'outil et de renforcer leur retour d'expérience sur l'acquisition de données quantitatives (Amplified Geochemical Imaging - AGI ; Lamb B. & al., 2009 ; Jay W. Hodny, Ph.D., James E. Whetzel, Jr., and Harry S. Anderson, 2009).

En termes de description technique, le « *EP SPG-0008 - AGI* » est composé d'une membrane tubulaire poreuse GoreTex® hydrophobe et chimiquement inerte, contenant quatre cartouches d'adsorbant disposées dans toute la longueur du dispositif (voir photographie du Tableau 3). 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, avec la possibilité d'échantillonner une très large gamme de substances allant des composés semi-volatils aux composés halogénés volatils⁴⁰. Cependant, leurs compositions et caractéristiques ne sont pas divulguées puisque les EP sont brevetés. La membrane GoreTex®, poreuse et hydrophobe permet l'utilisation de l'échantillonneur passif dans des milieux humides (eau souterraine, gaz du sol et les sédiments) tout en préservant l'intégrité des adsorbants. La membrane poreuse contrôle le flux

³⁸ Il est à souligner que BEACON Environmental Services mentionne la possibilité de la mise en œuvre d'une centaine d'EP BeSure® Sampler par jour en l'absence de béton ou asphalte en surface.

³⁹ Devenue dans le courant de l'année 2013 Amplified Geochemical Imaging, LLC (AGI).

⁴⁰ Il est à souligner que la société AGI commercialisé également un autre EP, le SPG-0001 pour les gaz du sol en présence de substances comme le chlorure de vinyle et le 1,1-dichloroéthène.

diffusif des substances du milieu vers l'intérieur de l'échantillonneur passif, et donc le taux d'échantillonnage du dispositif.

Les composés échantillonnés au regard des caractéristiques des adsorbants développés, sont parmi une très large gamme de substances, plus d'une centaine, allant des composés semi-volatils aux composés halogénés volatils, dont les Total Petroleum Hydrocarbons (TPH), etc.

En termes de conditions d'utilisation des échantillonneurs, sont mentionnés les éléments suivants en termes de gammes, de 0,01 à 50 µg pour la masse, de 0°C à 35° C pour la température, de 0 à 95% pour le taux d'humidité relative, de 0 à 0,9 m/sec pour la vitesse de l'air.

D'autres informations concernant la gamme de masse sont mentionnées dans le paragraphe ci-après relatif aux résultats des analyses fournis par AGI.

Les applications proposées par Amplified Geochemical Imaging pour le « *EP SPG-0008 - AGI* » sont :

- l'étude de screening des gaz du sol ;
- l'acquisition de données semi-quantitatives (voire quantitatives sous certaines conditions et qui étaient en cours de validation auprès de l'US EPA) ;
- la caractérisation des milieux et diagnostic (localisation et délimitation de la source de pollution et de son panache) ;
- l'identification de voies de transfert préférentielles dans la cadre d'études en lien avec l'évaluation des risques sanitaires ;
- l'optimisation des plans d'échantillonnage ;
- l'optimisation de la localisation d'ouvrages permanents (piézomètres, piézairs) ;
- l'optimisation des travaux de dépollution ;
- le suivi des travaux de dépollution et suivi à long terme ;
- l'identification de rejets historiques (solvants, carburants, etc.).

D'une manière plus générale, la société recommande l'utilisation du « *EP SPG-0008 - AGI* » pour sa facilité de mise en œuvre du prélèvement sur site, la possibilité de réaliser les prélèvements sans perturber l'activité usuelle du site, la mise en œuvre d'un grand nombre de prélèvements (en particulier dans le cas de sites de grande superficie), ainsi que la grande variété de composés ciblés. Il peut être utilisé en lieu et place des techniques usuelles de prélèvement (technique alternative) ou en tant que technique complémentaire, mise en œuvre en parallèle.

Le « *EP SPG-0008 - AGI* » est proposé pour la mise en œuvre de prélèvement dans différentes matrices environnementales : les eaux souterraines, les gaz du sol dans des ouvrages tubés ou non tubés (possibilité d'enfouissement direct dans le sol) ; l'air sous-dalle de bâtiment (sub-slab), et l'air à l'intérieur de bâtiment.

Dans le cas des études de screening des gaz du sol, et leur mise en place dans des trous non équipés, la société AGI recommande comme profondeur des EP de l'ordre de 2 à 3 pieds, soit de 0,6 à 1 m.

Quelques cas d'études, réalisés par la société ou des clients, sont mis en avant par l'entreprise pour démontrer les performances de l'outil (cf. les références Amplified Geochemical Imaging en section 6).

L'Annexe 1 illustre des exemples de mise en place du « *EP SPG-0008 - AGI* » pour les gaz du sol dans un ouvrage non tubé (enfouissement direct dans le sol) et d'air sous-dalle de bâtiment (sub-slab), extraits de références.

Les données fournies par AGI sont des données qualitatives (masses) et quantitatives (concentrations) selon les objectifs de l'étude, et pour les gaz du sol tenant compte des équations présentées en section 2.5 (Équation 3 et Équation 4), au regard de la spécificité des éléments d'informations fournis par l'opérateur.

Les taux d'échantillonnage définis en laboratoire (chambre à atmosphère contrôlée) par AGI pour les substances étudiées sont transmis dans le cadre du présent projet via les bordereaux d'analyses ou des échanges avec AGI.

La Figure 11 présente un exemple de courbes d'adsorption en masse. Il est à souligner que la pente initiale et la masse d'équilibre finale augmentent avec des concentrations croissantes. Pour une durée plus courte, l'augmentation est pratiquement linéaire, mais à mesure que la masse augmente vers l'état stationnaire, l'absorption de masse ralentit et la masse atteint finalement une asymptote. La plage initiale est désignée sous le nom de plage linéaire dynamique tandis que l'étape ultérieure est désignée sous le nom de plage d'équilibre. L'étalonnage du taux d'échantillonnage pour cet échantillonneur passif s'appliquera à la plage dynamique linéaire et proche de la linéarité, où la performance et la précision sont les meilleures.

Ainsi, en dehors de cette plage, la précision de la méthode de calcul de conversion des résultats de masse en concentration n'est plus suffisante et les résultats obtenus ne permettent pas de conclure.

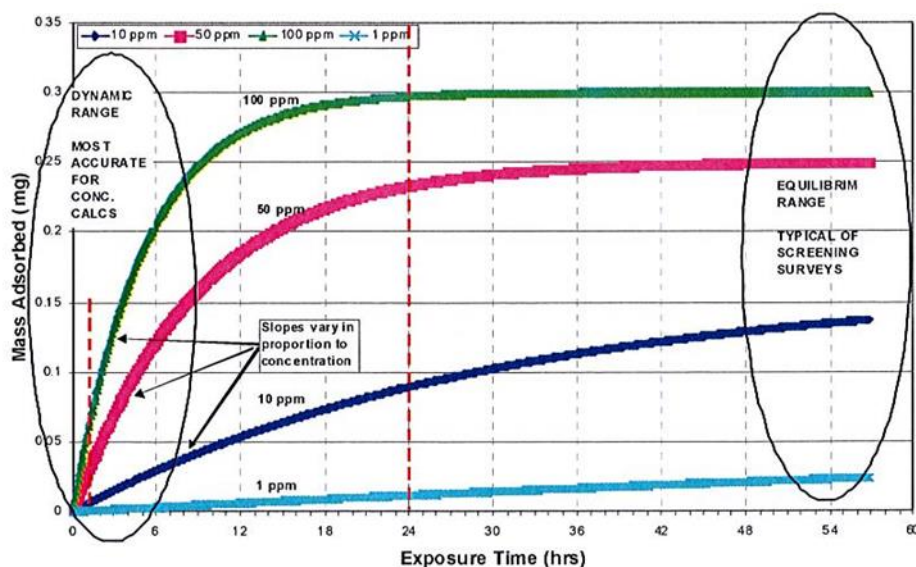


FIGURE 11 - EXEMPLES DE COURBES D'ADSORPTION (AGI, 2015)

Par ailleurs, parmi les éléments fournis par la société AGI pour le « EP SPG-0008 - AGI » dans le cadre de ce projet, il a été mentionné les éléments suivants : « lorsque la masse augmente sur l'adsorbant et approche de la saturation, des phénomènes de rétro-diffusion peuvent se produire, entraînant une diminution du taux d'échantillonnage. Finalement, la masse atteindra une valeur d'état stable maximale à toute concentration. AGI, afin d'éviter ces effets de saturation, recommande de conserver la masse totale du support en dessous de 50 μg . A partir de données expérimentales, AGI indique avoir trouvé que cette plage de sécurité peut être étendue potentiellement jusqu'à 100 μg ».

Lors d'échanges dans le cadre de ce projet, il a également été indiqué concernant la linéarité de masse adsorbée, que l'équation utilisée pour le calcul de la concentration dans les gaz du sol, comprend des résultats jusqu'à une masse de l'ordre 170 μg et qu'il est recommandé des durées d'exposition de 3 à 5 jours pour les prélèvements de gaz du sol et de 24 heures pour l'air.

Concernant cet EP, lors d'un échange avec AGI, il a également été spécifié les éléments suivants : « La masse accumulée est le facteur critique. L'échantillonneur fonctionne bien pour des concentrations élevées si les temps d'exposition sont courts. Nous voulons cibler moins de 15 μg de masse accumulée sur l'échantillonneur. Les composés de poids moléculaire plus élevé ne sont pas aussi efficaces que les composés de poids moléculaire inférieur (DCE⁴¹ au benzène). Les 150 μg semblent permettre une absorption linéaire de la gamme des composés rapportés ».

En outre, sur les bordereaux de résultats du projet TEMPAIR, il apparaît que certains résultats en masse ou en concentration sont annotés avec la lettre « E », sigle que la société AGI définit comme « une valeur en masse estimée, la valeur en masse excédant la limite supérieure de calibration ». Ces résultats annotés avec « E » indique par ailleurs généralement des masses supérieures à 50 μg . Dans la suite du présent rapport, ces résultats seront commentés comme des valeurs qualifiées par le laboratoire comme des valeurs estimées (masse supérieure à la gamme de calibration analytique).

⁴¹ Dichloroéthylène

2.6.1.3 L'échantillonneur passif TIPS (en cours de développement) de l'entreprise Amplified Geochemical Imaging LLC (AGI)

L'entreprise Amplified Geochemical Imaging, LLC (AGI) développe de nouveaux échantillonneurs pour répondre aux besoins de ces clients (Lamb B. et al., 2009), comme notamment le TIPS. S'il était initialement plus adapté à la détection d'éléments volatils à l'état de trace, l'entreprise développe peu à peu la technologie afin de permettre le prélèvement de composés volatils ou semi-volatils présents dans le milieu à des concentrations élevées, pour une durée d'exposition de quelques jours à quelques semaines.

Cet échantillonneur en cours de développement, le « *EP TIPS - AGI* » a été utilisé dans le cadre de ce projet mais il n'était pas commercialisé sur le site de la société AGI en date de la finalisation de ce rapport.

Sur la base des échanges avec l'entreprise Amplified Geochemical Imaging, LLC, des taux d'échantillonnage plus précis pour l'échantillonneur étaient toujours en cours d'établissement début 2016.

En termes de description technique, il est composé d'une membrane tubulaire poreuse GoreTex® hydrophobe et chimiquement inerte, contenant quatre cartouches d'adsorbant. Mais, contrairement au « *EP SPG-0008 - AGI* », ces 4 cartouches sont disposées côte à côte dans un vial en verre muni d'un bouchon partiellement composé d'une membrane (voir photographie du Tableau 3).

Les composés échantillonnés au regard des caractéristiques des adsorbants développés, sont parmi une très large gamme de substances, plus d'une centaine, allant des composés semi-volatils aux composés halogénés volatils, dont les Total Petroleum Hydrocarbons (TPH), etc.

En termes d'application, il est à souligner que ce « *EP TIPS - AGI* » est toujours en phase de R&D et aucun document de présentation n'est disponible sur le site internet de la société AGI.

Il est à souligner que cet EP est conçu de telle sorte que le taux d'échantillonnage des composés est beaucoup moins élevé pour le « *EP SPG-0008 - AGI* ». Cela permet d'être exposé à des concentrations plus élevées ou d'être déployé pour de plus longues périodes de temps. Au regard du « *EP SPG-0008 - AGI* », le taux d'échantillonnage est contrôlé en plaçant les mêmes adsorbants à l'intérieur d'un contenant restreint en termes de surface. Ce changement de surface est la raison pour laquelle des masses différentes sont obtenues entre les deux EP, et pourquoi le « *EP TIPS - AGI* » semble fonctionner pour des concentrations plus élevées.

Les données fournies sont des données qualitatives (masses) et quantitatives (concentrations) selon les objectifs de l'étude, et pour les gaz du sol tenant compte des équations présentées en section 2.5 (Équation 3 et Équation 4), au regard de la spécificité des éléments d'informations fournis par l'opérateur comme explicité en section 2.5.

Les taux d'échantillonnage pour les substances étudiées définis en laboratoire (chambre à atmosphère contrôlée) par AGI ne sont pas transmis via le bordereau d'analyse ni lors d'échanges avec AGI, cet EP étant encore en cours de développement lors de la réalisation du projet TEMPAIR.

De même que mentionné en section 2.6.1.2, sur les bordereaux de résultats du projet TEMPAIR, il apparaît que certains résultats en masse ou en concentration sont annotés avec la lettre « E », sigle que la société AGI définit comme « une valeur en masse estimée, la valeur en masse excédant la limite supérieure de calibration ». Dans la suite du présent rapport, ces résultats seront commentés comme des valeurs qualifiées par le laboratoire comme des valeurs estimées (masse supérieure à la gamme de calibration analytique).

2.6.1.4 L'échantillonneur passif de BEACON Environmental Services, composé d'un tube en acier avec adsorbant et sans tête de diffusion (proposée depuis l'été 2016)

En termes de description technique, les tubes proposés par BEACON Environmental Services, à géométrie axiale, sont composés d'un tube en acier inoxydable (type Perkin Elmer) dans lequel est introduit un cartouche avec un adsorbant adapté aux substances étudiées, avec tête de diffusion (proposée depuis la fin du projet en 2016) (voir photographie du Tableau 3). Dans le cas d'une contamination aux solvants chlorés, l'entreprise BEACON recommande d'utiliser deux types d'adsorbant différents : Spherocarb et Carbotrap ou du Chromosorb 106.

Les composés échantillonnés seront fonction du choix des adsorbants, et parmi une très large gamme de substances, plus de 150, allant des composés semi-volatils aux composés halogénés volatils, les Total Petroleum Hydrocarbons (TPH), etc.

Les applications proposées indiquent uniquement des études de caractérisation des concentrations dans l'air intérieur et extérieur, ainsi que des études de suivi des émissions de vapeurs du sol vers les bâtiments, avec des durées d'exposition allant d'une heure à 30 jours.

Les données fournies sont uniquement des données quantitatives (concentrations), et pour les gaz du sol tenant compte de l'équation présentée en section 2.5 (Équation 2).

Les taux d'échantillonnage pour les substances étudiées sont transmis dans le cadre du présent projet pour les EP avec Chromosorb 106 via les bordereaux d'analyses.

2.6.1.5 L'échantillonneur passif conditionné par l'INERIS (un développement interne), composé d'un tube en acier avec un adsorbant de type « Radiello® 145 » et d'une tête de diffusion

Historiquement, l'INERIS a travaillé sur une méthode simple pour adapter le dispositif de type corps diffusif avec adsorbant Radiello® de code 145 pour l'air intérieur à des concentrations plus élevées. Pour cela, un dispositif à géométrie axiale possédant un taux d'échantillonnage plus faible que le dispositif de type corps diffusif avec adsorbant Radiello® a été mis au point. Cet échantillonneur passif avec adsorbant « Radiello® » et une géométrie axiale a été développé par l'INERIS et le LCSQA, dans le cadre d'études en lien avec la surveillance de la qualité de l'air intérieur dans des lieux clos ouverts au public et plus particulièrement pour la quantification du benzène et du perchloroéthylène.

Avant les projets PassSolAir et TEMPAIR, cet EP n'avait jamais été utilisé dans le cadre d'études en lien avec les sites et sols pollués pour la caractérisation des gaz du sol.

Le retour d'expérience actuel est donc limité à la matrice « air intérieur ». Cependant, différentes études ont été menées, notamment en chambre à atmosphère contrôlée (mesure du taux d'échantillonnage, évaluation des performances de l'échantillonneur pour différentes gammes de concentrations, etc.) mais également directement sur site. Les durées de prélèvement sont de l'ordre de 4,5 jours. Ces études se sont limitées actuellement à un nombre restreint de composés à savoir le benzène, le formaldéhyde et l'acétaldéhyde. Les résultats obtenus sont probants et démontrent la pertinence de l'échantillonneur pour cette application (LCSQA, 2004 ; INERIS, 2004a ; INERIS, 2004b).

En termes de description technique, cet échantillonneur passif à géométrie axiale est composé d'un tube en acier inoxydable (type Perkin Elmer), dans lequel est introduit un cartouche d'adsorbant, dans le cadre du développement INERIS, un cartouche d'adsorbant Radiello® de code 145, et muni d'une tête de diffusion (voir photographie du Tableau 3).

La cartouche d'adsorbant utilisée est le Radiello® de code 145, qui est un tube d'acier inoxydable à la maille 3x8 µm rempli avec 350±10 mg de charbon graphité (Carbograph 4) 35-50 mesh.

Toutefois, d'autres cartouches d'adsorbant peuvent être choisies en fonction des composés ciblés.

Les composés échantillonnés, avec le « EP tube avec Radiello 145 » sont actuellement uniquement le benzène et le tétrachloroéthylène, les seules substances pour lesquels les taux d'échantillonnage sont connus.

Les applications classiques sont la surveillance de la qualité de l'air intérieur.

Dans le cadre du projet TEMPAIR, leur utilisation pour les gaz du sol est testée.

Les données fournies initialement pour le milieu air, sont des données qualitatives (masses) et quantitatives (concentrations), et également pour les gaz du sol tenant compte de l'équation présentée en section 2.5 (Équation 2).

Les taux d'échantillonnage sont connus pour le benzène et le tétrachloroéthylène et disponible dans la publication de Gonzalez-Flesca, N. and A. Frezier (2005).

2.6.1.6 Autres échantillonneurs passifs

Le plan d'échantillonnage a également comporté comme mentionné en section 3.1 des prélèvements d'air intérieur et extérieur ayant conduit à l'utilisation d'un autre échantillonneur passif décrit ci-dessous, le Radiello avec un corps diffusif (jaune code 120-2) et un adsorbant Radiello® de code 145.

L'échantillonneur passif développé par Radiello® avec adsorbant (dans le cadre du projet, l'adsorbant Radiello de code 145) placé avec un corps diffusif,

Préambule : cet EP n'a pas été mis en œuvre dans le plan d'échantillonnage des gaz du sol, mais cela serait envisageable dans des ouvrages permanents (piézairs).

Cet EP est commercialisé par la société Radiello® et tout autre revendeur.

En termes de description technique, l'EP dénommé dans ce rapport « EP corps diffusif avec Radiello 145 » (voir photographie du Tableau 3) à diffusion radiale (cf. Figure 6) est composé d'un « cartouche Radiello de code 145 » : un adsorbant (350±10 mg de charbon graphité (Carbograph 4) 35-50 mesh) 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, introduit dans un corps diffusif cylindrique poreux en polyéthylène (corps diffusif jaune code 120-2). L'ensemble est vissé classiquement pour les prélèvements d'air sur une

plaque de support. La diffusion pour ce dispositif est radiale car l'adsorption se fait sur toute la surface du cylindre et non, seulement à son extrémité. D'autres adsorbants et corps diffusifs sont également commercialisés.

Les composés échantillonnés seront fonction du choix de l'adsorbant Radiello, et parmi une très large gamme de substances (80), allant des composés semi-volatils aux composés halogénés volatils.

Les applications sont déjà aujourd'hui éprouvées pour la surveillance de la qualité de l'air et de manière moins courante dans le cadre des études sites et sols pollués pour la mesure des expositions intérieures. Néanmoins, leur utilisation tend à se généraliser.

Aucune référence n'est disponible pour leur utilisation dans les gaz du sol. Néanmoins, dans le cadre de TEMPAIR, il a semblé intéressant de le tester dans le cadre de la caractérisation de l'air intérieur et extérieur au regard du plan d'échantillonnage établi (cf. section 3.1).

Les données fournies sont des données qualitatives (masses) et quantitatives (concentrations). Pour les gaz du sol, l'équation utilisée est celle présentée en section 2.5 (Équation 2).

Les taux d'échantillonnage pour le PCE et pour de nombreuses autres substances sont connus et disponibles sur le site Internet de Radiello (www.radiello.com) dans le manuel dédié.

L'échantillonneur passif Waterloo Membrane Sampler™ (WMS™)

A titre informatif, l'Annexe 2 présente l'échantillonneur passif cinétique Waterloo « Waterloo Membrane Sampler™ (WMS™) (passive permeation sampler), initialement développé par Suresh Seethapathy et Tadeusz Góreckià de l'Université de Waterloo (Faten Salim, 2013), qui est commercialisé depuis 2013 par SiREM pour la caractérisation des gaz du sol. Les analyses sont assurées par Air Toxics Ltd. (Folsom, CA) par GC / MS.

Avertissement :



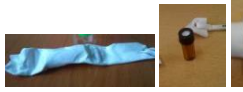



Du fait que cet échantillonneur passif n'est commercialisé que depuis 2013, il n'a pu être utilisé ni dans le cadre du projet PassSolAir ni dans le cadre du projet TEMPAIR.

2.7 Synthèse des caractéristiques des échantillonneurs passifs

Le Tableau 4 présente de façon synthétique les EP utilisés dans le projet pour les prélèvements des gaz du sol et également de l'air à l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment, en donnant une description technique, la liste des familles de composés échantillonnés, la ou les techniques d'analyses chimiques associées, et le type de résultats obtenus⁴².

⁴² Le corps diffusif avec adsorbant Radiello 145 n'a pas été mis en œuvre pour les prélèvements de gaz du sol dans le cadre de ce projet, mais cela pourrait être envisageable dans le cas de prélèvement par le biais d'un piézair.

TABLEAU 4 - SYNTHÈSE DES CARACTÉRISTIQUES DES ÉCHANTILLONNEURS PASSIFS POUR LES GAZ DU SOL

Illustration						
Nom dans ce rapport	« EP BeSure Sampler - BEACON »	« EP SPG-0008 - AGI »	« EP TIPS - AGI »	« EP tube avec adsorbant chromosorb 106 - BEACON »	« EP tube avec adsorbant Radiello 145 »	« EP corps diffusif avec adsorbant Radiello 145 »
Nom commercial	BeSure® Sampler	SPG-0008	TIPS	« tube passif avec adsorbant »		corps diffusif et adsorbant Radiello® 145
Constructeur/ fournisseur	BEACON Environmental Services Inc.	Amplified Geochemical Imaging, LLC (AGI)	Amplified Geochemical Imaging, LLC (AGI)	BEACON Environmental Services Inc.	INERIS (conditionné sur demande ; usage interne)	Radiello®
Site internet	http://www.beacon-usa.com/	https://www.agisurveys.net/	https://www.agisurveys.net/	http://www.beacon-usa.com/	-	http://radiello.com ou site d'autres revendeurs
Disponibilité commerciale	commercialisé	commercialisé	en cours de développement	commercialisé	usage interne INERIS (développement INERIS), conditionné sur demande	commercialisé
Matrices échantillonnées						
<i>air intérieur/extérieur</i>	X	X	X	X	X	X
<i>gaz du sol</i>	X	X	X	X Initialement conçu pour l'air à l'intérieur et l'extérieur de bâtiment	X Initialement conçu pour l'air à l'intérieur et l'extérieur de bâtiment	X Initialement conçu pour l'air à l'intérieur et l'extérieur de bâtiment
<i>eau souterraine</i>		X	X			
Composés ciblés	large gamme de composés dont BTEX et solvants chlorés	large gamme de composés dont BTEX et solvants chlorés	large gamme de composés dont BTEX et solvants chlorés	fonction de l'adsorbant choisi (ici COVs C ₂ -C ₅)	actuellement uniquement pour le benzène et le PCE	large gamme de composés dont BTEX et solvants chlorés (5)
Résultats renseignés						
<i>masse</i>	X	X	X	X	X	X
<i>concentration (0)</i>		X	X	X	X	X
Adsorbant	unique (composition non divulguée)	unique (composition non divulguée)	unique (composition non divulguée)	choix en fonction de la substance (spherocarb et carbotrap ou du chromosorb 106, etc.)	choix en fonction de la substance, ici le benzène et le PCE (Radiello® 145...)	choix en fonction de la substance (Radiello® 145...)
Enveloppe de l'adsorbant permettant la diffusion des gaz et autres éléments de protection de l'adsorbant ou du dispositif	- « sac grillagé » contenant l'adsorbant - tête de diffusion (grille) - vial en verre	- membrane GoreTex® hydrophobe (et perméable au gaz) entourant l'adsorbant inclus dans une résine	- membrane GoreTex® hydrophobe externe (et perméable au gaz) entourant un vial en verre équipé d'un bouchon muni d'une membrane GoreTex®, adsorbant inclus dans une résine, contenu dans le vial	- tête de diffusion (grille) (depuis 08/2015) - tube en acier inox	- tête de diffusion (grille) - tube en acier inox	- tube en grille acier - corps diffusif poreux (différents types)
Taux d'échantillonnage	défini par BEACON en laboratoire	défini par AGI en laboratoire	défini par AGI en laboratoire	défini par BEACON en laboratoire	défini par l'INERIS en laboratoire uniquement pour le benzène et le PCE	défini par Radiello
Analyses	par le fournisseur (USA)	par le fournisseur (USA)	par le fournisseur (USA)	par le fournisseur (USA)	INERIS	tous laboratoires
Technique analytique	TD – GC/MS	TD – GC/MS	TD – GC/MS	GC/MS	TD – GC/MS ou TD-GC/MS/FID	GC/MS/ FID
Coûts en 2015 (incluant l'échantillonneur, transport et analyses)	185 \$US (1)	190 \$US (2)	185 \$US (3)	250 \$US (4)	Usage interne	De l'ordre de 160 Euros

(0) d'après le constructeur et selon les hypothèses et paramètres de terrain.

(1) Pour l'analyse de 11 substances (PCE, TCS, cis DCE, trans DCE, CV, 1,1 DCE) dans le cadre du présent projet et du projet PassSolAir (ADEME, INERIS, 2017)

(2) Pour l'analyse de 37 substances, le coût incluant la fourniture et l'analyse de 2 blancs de transport par matrice caractérisée dans le cadre du présent projet et du projet PassSolAir (ADEME, INERIS, 2017).

(3) Pour l'analyse de 11 substances dans le cadre du présent projet.

(4) Pour l'analyse de 7 substances (PCE, TCE, BTEX) dans le cadre du présent projet ou de 11 substances dans le cadre du projet PassSolAir (ADEME, INERIS, 2017).

(5) d'autres cartouches avec d'autres adsorbants sont également disponibles au regard des substances d'intérêt.

2.8 Etudes d'intercomparaison d'échantillonneurs passifs

Plusieurs études d'intercomparaison de échantillonneurs passifs réalisés dans des chambres d'exposition sont décrites dans la littérature (AGI ; BEACON ; McHalary, 2014⁴³ ; etc.). Leurs conclusions ne seront pas reprises dans le présent rapport car elles concernent principalement des conditions de prélèvements d'air.

Comme mentionné précédemment, en section 2.1, ce projet TEMPAIR complète les connaissances sur la mise en œuvre des EP, initiées dans le projet PassSolAir (ADEME, INERIS, 2017), dont le plan d'expérience comportait deux approches différentes mais néanmoins complémentaires :

- des tests réalisés en laboratoire, dans une chambre à atmosphère contrôlée⁴⁴ avec du PCE ;
- des tests réalisés sur un site industriel pollué aux solvants chlorés (PCE et TCE essentiellement).

Les résultats rapportés en Annexe 3, concernent plus particulièrement les conclusions associées aux tests en chambre à atmosphère contrôlée permettant de simuler de manière répétable et maîtrisée, des atmosphères contaminées en composés volatils ; cette chambre ayant pour vocation d'évaluer les performances de moyens métrologiques dans des conditions environnementales variables. Les conclusions de ces tests sont présentées dans l'Annexe 3 et repris dans la synthèse de ce rapport.

Les échantillonneurs passifs mis en œuvre étaient les « *EP BeSure Sampler - BEACON* », « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* », « *EP SPG-0008 - AGI* », « *EP TIPS - AGI* », « *EP tube avec Radiello 145* » et « *EP corps diffusif avec Radiello 145* », le plan d'échantillonnage comportant plusieurs tests de répétabilité.

Les conditions de mise en œuvre, dont des taux élevés d'humidité de 70 à 86%, correspondaient plus particulièrement à celles observées lors de campagnes de mesures des gaz du sol. Quant aux gammes de concentration générées, elles étaient de 0,05 mg/m³ durant 2 ou 7 jours, 0,1 mg/m³, 5 mg/m³, 14 mg/m³, 40 mg/m³ et 612 mg/m³ durant 2 jours.

⁴³ Etude notamment avec 4 EP : un tube Perkin Elmer avec un adsorbant sans tête de diffusion, le Radiello™ corps diffusif, le badge SKC Ultra II™, le Waterloo Membrane Samplers™, avec des gammes de concentrations de 1, 50, 100 ppbv et des durées d'exposition de 1, 4, 7 jours, des taux d'humidité de 30, 60, 90%, des vitesses de vent de 0,041, 0,23, 0,41 m/s.

⁴⁴ La conception de cette chambre ainsi que les tests de validation sont décrits dans la publication de Gonzalez-Flesca, N. et Frezier, A., 2005.

3. Expérimentations

3.1 Plan d'échantillonnage

Préambule

En préambule, il est rappelé que les prélèvements dans l'air à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment, uniquement réalisé dans le cadre précisé ci-après ne sont mentionnés qu'en Annexe 4. Le choix de ce milieu dans lequel l'adsorption est mieux maîtrisée que dans les gaz du sol, a été retenu afin de permettre de confirmer ou infirmer les tendances observées sur l'utilisation des EP dans les gaz du sol. Dans le cadre du projet PassSolair, le site pilote étant encore en activité, les expérimentations dans l'air intérieur n'avaient pas été réalisées dans des conditions optimales en termes d'études d'intercomparaison des différents échantillonneurs passifs et prélèvements dynamiques. En outre, ce plan d'expérience dans l'air permet de s'affranchir de l'impact potentiel « des incertitudes » de la formulation de conversion des résultats de la masse en concentration, ne faisant pas intervenir le « facteur d'influence du sol », intégrant des caractéristiques du sol, comme dans le cas de la caractérisation des gaz du sol telle que présentée par AGI (cf. section antérieure 2.5) lors de l'utilisation des « EP SPG-0008 - AGI » et des « EP TIPS - AGI ».

Les moyens déployés reposent également sur la réalisation de prélèvements légèrement décalés dans les gaz du sol à l'aide des échantillonneurs passifs et de prélèvements par pompage dynamique sur charbon actif (charbon actif d'une masse de 50 mg de la marque SKC comportant deux zones, une zone de mesure et une zone de contrôle). Ces prélèvements dynamiques avec charbon, réalisés avant et/ou après l'exposition des échantillonneurs passifs⁴⁵, sont considérés, dans le protocole expérimental comme des prélèvements de référence, respectivement de « début d'exposition » et de « fin d'exposition » des échantillonneurs passifs, au regard de la faible variabilité temporelle des concentrations observées principalement sur les résultats des prélèvements mis en œuvre avant et après les prélèvements de gaz du sol avec les EP⁴⁶.

Dans le projet TEMPAIR, en ce qui concerne les gaz du sol, trois campagnes de prélèvements ont été réalisées en 2014 et 2015 sur le site atelier qui a été décrit précédemment en section 1.4.1 sur des périodes de un à sept jours dans 7 piézaires captant différents horizons lithologiques (remblais, sols sableux, limoneux) à différentes profondeurs et également sur des périodes de six à sept jours dans 5 trous de sondage de sub-surface non équipés, de faible diamètre (suffisant pour la mise en place des EP) et obturés par un bouchon étanche (mise en place des EP dans le sol suite au fonçage manuel d'un orifice d'une profondeur de l'ordre de 50 cm), au droit de 3 différentes zones du site. Le choix des ouvrages a été réalisé afin d'être dans des gammes de concentrations en PCE différentes, pour les gaz du sol de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au g/m^3 .

Outre le choix de zones avec des gammes de concentrations différentes, la réalisation de campagnes alliant des prélèvements de gaz du sol dans des piézaires et des trous de sondage de sub-surface non équipés et obturés par un bouchon étanche, devaient permettre l'évaluation des EP dans deux configurations au regard du volume d'air autour des EP, plus important dans un piézaire que dans un trou de sondage non équipé (obturé par un bouchon étanche), et ainsi d'approcher l'impact potentiel du facteur différenciant l'échantillonnage de l'air et des gaz du sol permettant l'ajustement du taux d'échantillonnage dans la formule de conversion des résultats de la masse en concentration utilisée particulièrement par la société AGI pour ses EP.

Les campagnes se sont déroulées en périodes estivales et hivernales, afin de couvrir des conditions environnementales différentes et donc *a priori* de gammes de concentrations différentes.

Les caractéristiques générales des piézaires ont été décrits succinctement en section 1.4.1 (pour de plus amples renseignements, le lecteur se reportera aux rapports de FLUXOBAT (Traverse et al, 2013)).

Objectifs et plan d'expérience de la caractérisation des gaz du sol dans des trous de sondage de sub-surface non équipés et obturés par un bouchon étanche

Ce test a été réalisé dans le cadre de la mise en œuvre d'une étude de screening des gaz du sol par le biais d'un prélèvement passif réalisé dans des trous de sondage non équipés et obturés par un bouchon étanche (mise en place des EP dans le sol suite au fonçage manuel d'un orifice d'une profondeur de l'ordre de 50 cm, de faible diamètre, suffisant pour la mise en place des EP), en présence de gammes de concentrations inférieures à celles rencontrées dans le cadre des tests avec les ouvrages permanents (piézaires).

⁴⁵ Dans le cas des prélèvements dans des trous de sondage non équipés, en cas de mise en œuvre des EP passifs dans plusieurs orifices, seul l'un d'eux a été l'objet d'un prélèvement dynamique.

⁴⁶ Généralement sur l'ensemble des mesures réalisées, d'un facteur 2, entre les concentrations mesurées avec le prélèvement dynamiques mis en œuvre avant et après, respectivement de « début d'exposition » et de « fin d'exposition » des échantillonneurs passifs.

Elles devaient également permettre de mieux appréhender les performances des EP en termes de données quantitatives, ainsi que l'impact de la méconnaissance du milieu (nature et caractéristiques des horizons investigués) en termes d'appréciation quantitative des concentrations au regard en particulier dans le cadre de l'approche proposée par la société AGI (cf. section 2.5).

Le Tableau 5 synthétise le plan d'expérimentation, mentionnant chacun des EP mis en œuvre et indique des durées d'exposition de 6 et 7 jours pour les EP, et de 15 et 30 minutes pour les prélèvements dynamiques avec charbon actif précédant ou succédant la période des prélèvements passifs.

Pour rappel de la section 2.6.1.4, la société BEACON propose les tubes à géométrie axiale avec des adsorbants pour la caractérisation de l'air. Cependant, ce type de dispositif, le « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » a été intégré au plan d'échantillonnage pour la caractérisation des gaz du sol dans des trous de sondage non équipés. La conversion des résultats en masse en concentration a été réalisée en considérant le milieu air (Équation 2) comme explicité en section 2.5.

Objectifs et plan d'expérience de la caractérisation des gaz du sol dans des ouvrages permanents (piézairs)

Vis-à-vis du projet PassSolAir (ADEME, INERIS, 2017), ces expérimentations ont été réalisées afin de tester le comportement des EP :

- dans d'autres conditions environnementales (nature des terrains, climat,...),
- avec d'autres gammes de concentrations,
- avec des durées d'exposition plus importantes,

Elles devaient également permettre d'appréhender :

- les performances des EP en termes de données quantitatives pour les gaz du sol (concentrations),
- l'impact du type d'ouvrage (piézair et trou de sondage non équipé obturé par un bouchon étanche, au regard du volume d'air autour des EP) et de la méconnaissance du milieu (nature et caractéristiques des horizons investigués) sur l'appréciation quantitative des concentrations en particulier lors de la déclinaison de l'approche proposée par la société AGI pour la conversion des résultats de masse en concentration (cf. section 2.5).

Les campagnes se sont déroulées en périodes estivales et hivernales, afin de couvrir des conditions environnementales différentes et donc a priori de gammes de concentrations différentes.

Le Tableau 5 synthétise le plan d'expérimentation, mentionnant chacun des EP mis en œuvre et indique des durées d'exposition de 1, 2, 6, 7 jours pour les EP, et de 15 et 30 minutes pour les prélèvements dynamique avec charbon actif précédant ou succédant la période des prélèvements passifs.

TABLEAU 5 - SYNTHÈSE DU PLAN D'ÉCHANTILLONNAGE DES CAMPAGNES AVEC LES EP

Échantillonneur (et abréviation utilisée dans la suite du rapport)	Gaz du sol dans des piézairs	Gaz du sol dans des trous de sondage non équipés et obturés par un bouchon étanche
	Nombre d'ouvrages et de campagnes, et durées d'exposition	
Prélèvement passif		
BeSure® Sampler de BEACON (« EP BeSure Sampler - BEACON »)	<ul style="list-style-type: none"> - 2 piézairs (Pza7, Pza12) : 1 campagne de 7 jours - 2 piézairs (Pza3, Pza4) : 2 campagnes de 7 jours - 8 piézairs (B11, Pza5, Pza6, Pza7, Pza12, Pza13, Pza19, Pza29) : 1 campagne de 5 jours - 1 piézair (Pza12) : 3 campagnes dont l'une avec 3 durées d'exposition successives de 1, 2 et 4 jours - 1 piézair (Pza8) : 1 campagne de 1 jour 	<ul style="list-style-type: none"> - 1 zone avec 2 lieux (zone des garage) : 1 campagne de 6 jours et une campagne de 7 jours - 1 zone avec 3 lieux (zone du jardin) : 1 campagne de 6 jours et 1 campagne de 7 jours
SPG 0008 de AGI® Survey (« EP SPG-0008 - AGI »)		
TIPS de AGI® Survey (en développement) (« EP TIPS - AGI »)		
Tube passif avec adsorbant Chromosorb 106 de BEACON sans tête de diffusion (« EP tube avec chromosorb 106 - BEACON »)		
Tube passif avec adsorbant Radiello® 145, avec tête de diffusion conditionné par l'INERIS (développement INERIS) (« EP tube avec Radiello 145 »)		
Prélèvement actif		
Tube avec charbon actif – SKC 2 zones (« PA avec CA »)	<ul style="list-style-type: none"> - ouvrages identiques à ceux-ci-dessus - durée variable en fonction des piézairs et campagnes : 10, 15, 20, 30, 60, 80, 90, 100 minutes, pour le prélèvement dynamique précédant ou succédant la période des EP 	<ul style="list-style-type: none"> - sondages identiques à ceux-ci-dessus - durée variable en fonction des sondages et campagnes : 15, 20, 30, 40, 60, 160, 180, 190 minutes pour le prélèvement dynamique précédant ou succédant la période des EP
Légende		
EP : échantillonneur passif ; PA : prélèvement actif ; CA : charbon actif.		

3.2 Mise en œuvre des prélèvements pour les gaz du sol dans des trous de sondage non équipés et dans des piézairs

Le protocole expérimental de mise en œuvre pour chaque milieu et campagne a été le suivant, les EP ayant été préparés et mis en place⁴⁷ et reconditionnés comme mentionné par les fournisseurs.

Dans le cas des piézairs existants sur site (Figure 12) :

- une purge⁴⁸ de l'ouvrage a uniquement été réalisée avant la réalisation du prélèvement dynamique lorsque ce dernier a précédé ou succédé le prélèvement passif. Dans ce cas, le piézair est purgé à l'aide d'un PID⁴⁹. La purge est dimensionnée en fonction de l'ouvrage investigué et poursuivie jusqu'à la stabilisation des paramètres suivis (valeur mesurée par le PID). Il est à souligner que des échanges ont eu lieu avec la société AGI concernant l'effet potentiel de la phase de purge réalisée en amont du prélèvement dynamique et passif ;
- les échantillonneurs passifs ont été introduits « en chapelet » dans le piézair jusqu'à mi-hauteur de l'intervalle crépiné, le piézair étant précautionneusement refermé avec la mise en place d'un bouchon étanche durant la durée du prélèvement.

⁴⁷ Les protocoles de préparation et mise en place ne sont pas repris dans ce rapport, le lecteur se reportera aux références citées.

⁴⁸ Cette phase de purge permettant de s'assurer de la relative stabilité des concentrations des gaz prélevés.

⁴⁹ Photo Ionized Detector



FIGURE 12 - ILLUSTRATION DE LA MISE EN ŒUVRE DES ECHANTILLONNEURS PASSIFS DANS DES PIEZAIERS

Dans le cas des trous de sondage non équipés (Figure 13) :

- le fonçage d'un orifice d'une profondeur de l'ordre de 50 cm et d'un diamètre de l'ordre de 2 à 3 cm a été réalisé ;
- les échantillonneurs passifs ont été introduits « en chapelet » dans le trou et placés dans la partie inférieure. Le trou a ensuite été refermé à l'aide d'un bouchon étanche pendant toute la durée du prélèvement ;
- en fin de période de prélèvement, le ou les échantillonneurs passifs ont été retirés du trou de sondage non équipé. Le trou a ensuite été refermé avec un bouchon étanche enterré afin d'être réutilisé lors de la campagne suivante. A l'issue de la dernière campagne, les trous ont été comblés avec du sol et des graviers.



FIGURE 13 - ILLUSTRATION DE LA MISE EN ŒUVRE DES ECHANTILLONNEURS PASSIFS DANS LES TROUS DE SONDRAGE NON EQUIPES

En termes de paramètres environnementaux, les mesures de la température et de l'humidité ont été réalisées avec des sondes thermo-hygrométriques KISTOCK KTH 350 ou KH 210 de la marque KIMO, et particulièrement pour :

- les piézaiers, de manière ponctuelle, durant de courtes périodes avant ou après la mise en œuvre des prélèvements dynamiques et passifs. En outre, des données issues des mesures réalisées en continu dans d'autres ouvrages lors de périodes antérieures ou postérieures ont également été prises en compte (cf. rapport TEMPAIR - Partie 1) ;
- les trous de sondage non équipés, également de manière ponctuelle, durant de courtes périodes avant ou après la mise en œuvre des prélèvements dynamiques et passifs. Lors de la dernière campagne, une sonde a été laissée en place durant toute la durée d'exposition des EP dans un trou situé à proximité de la zone investiguée.

3.3 Protocoles analytiques

Le Tableau 6 reprend en fonction des échantillonneurs utilisés, les méthodes d'analyse, ainsi que les incertitudes analytiques tant pour les résultats dans les gaz du sol que dans l'air à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment.

TABLEAU 6 - METHODES ANALYTIQUES ET INCERTITUDES ANALYTIQUES DES RESULTATS POUR LE PCE

Échantillonneur	Méthodes d'analyses (extractions et analyses) et laboratoire	Incertitudes analytiques (%)
Prélèvement passif		
« EP BeSure Sampler - BEACON »	thermodésorption et analyse (TD)/GC-MS, méthode de l'US EPA 8260C modifié (BEACON Environmental Services Inc., USA)	45-53 (1)
« EP SPG-0008 - AGI »	thermodésorption et analyse GC-MS, méthode 8260C modifiée de l'US EPA (AGI, USA)	16
« EP TIPS - AGI »	thermodésorption et analyse GC-MS, méthode 8260C modifiée de l'US EPA (AGI, USA)	16
« EP tube avec chromosorb 106 - BEACON »	analyse CG-MS, méthode de l'US EPA Method TO-17 (BEACON Environmental Services Inc., USA)	45-53 (1) ⁵⁰
« EP tube avec Radiello® 145 »	thermodésorption (désorbeur thermique Turbomatrix de Perkin Elmer) et analyse CG/SM/FID (INERIS, France)	30
« EP corps diffusif avec Radiello® 145 »	thermodésorption (désorbeur thermique Turbomatrix de Perkin Elmer) et analyse CG/SM/FID (INERIS, France)	30
Prélèvement actif		
PA tube avec charbon actif	extraction chimique au CS ₂ , analyse par GC-MS (AGROLAB, France)	38
Légende		
EP : échantillonneur passif ; PA : prélèvement actif ; (1) : Dans les illustrations des figures, une valeur moyenne de 50% est retenue pour l'incertitude analytique.		

3.4 Résultats de caractérisation des gaz du sol dans des trous de sondage non équipés

3.4.1 Résultats en masse

La Figure 14 illustre sous forme cartographique, les tendances des résultats en masse des EP commercialisés plus spécifiquement pour des études de screening⁵¹, les « EP SPG-0008 - AGI », des « EP TIPS - AGI », et des « EP BeSure Sampler - BEACON », au droit de la zone du jardin du site et de la zone des garages, sur une carte du site pour la campagne de novembre/décembre 2014 et d'août 2015. Elle intègre également les résultats associés aux deux piézaires de la zone des garages (Pza3 et Pza4) situés à proximité des trous de sondage non équipés.

Pour chacune des zones, l'examen de la Figure 14 avec les résultats des 3 EP dédiés plus particulièrement aux prélèvements de gaz du sol indique pour :

- la zone du jardin du site (lieux SC-Z-J-1, SC-Z-J-2 et SC-Z-J-3, une zonation identique pour chacun des trois EP en termes de masses maximale (couleur plus foncée) et minimale (couleur plus claire) pour tous les EP, respectivement le lieu SC-Z-J-1 et le lieu SC-Z-J-3, tant pour la campagne de novembre/décembre 2014 que celle d'août 2015 pour les dispositifs mis en œuvre lors des deux campagnes.

La zonation est identique au regard des concentrations issues des prélèvements dynamiques avec charbon ;

⁵⁰ Il est à mentionner, comme indiqué dans la section relative au projet PassSolAir, que pour ce dernier l'incertitude est de 5%.

⁵¹ Pour le « EP BeSure Sampler - BEACON », les résultats sont uniquement des masses adsorbées qui ne sont pas transposées en concentrations.

- la zone des garages (lieux SC-Z-Pza 3-4_1/2/3 et SC-Z-CP-1), une zonation identique pour les deux « *EP SPG-0008 - AGI* » et « *EP TIPS - AGI* » en termes de masses maximale (couleur plus foncée) et minimale (couleur plus claire), respectivement le lieu SC-Z-Pza 3-4_1/2/3 et le lieu SC-Z-CP-1 pour la campagne de novembre/décembre 2014, mais qui s'inverse pour la campagne d'août. En ce qui concerne le « *EP BeSure Sampler - BEACON* », dont seule la campagne de novembre/décembre 2014 peut être commentée (absence d'échantillonneur en août 2015 au lieu SC-Z-CP-1), une valeur maximale est observée au lieu SC-Z-CP-1.

En conclusion, au regard des échantillonneurs utilisés⁵², les résultats en masse indiquent une zonation identique pour chacun des trois échantillonneurs passifs en termes de masses maximale (couleur plus foncée) et minimale (couleur plus claire) pour les deux zones étudiées, la zone des jardins et la zone des garages, et cela tant pour la campagne de novembre/décembre 2014 que celle d'août 2015, à l'exception près suivante. Pour la zone des garages, la zonation s'inverse pour la campagne d'août pour les « *EP SPG-0008 - AGI* » et « *EP TIPS - AGI* ».

Les résultats en masse apparaissent cohérents entre les différents EP en termes de zonation.

⁵² Pour rappel, chaque échantillonneur passif a ses propres spécificités.



FIGURE 14 - CARTOGRAPHIE EN MASSE (μg) DU PCE DANS LES GAZ DU SOL DES TROUS DE SONDAGE DE SUB-SURFACE NON EQUIPES ET OBTURES PAR UN BOUCHON ETANCHE ET DES PIEZAIRS POUR LES « EP BeSURE SAMPLER - BEACON », « EP SPG-0008 – AGI » ET « EP TIPS - AGI » POUR LES CAMPAGNES DE NOV.-DEC. 2014 ET AOUT 2015

3.4.2 Résultats en concentration

3.4.2.1 Préambule

En rappel de la section 2.5, pour les « *EP SPG-0008 - AGI* » et « *EP TIPS - AGI* », le calcul des résultats en concentration à partir des résultats en masse l'introduction d'un facteur différenciant l'échantillonnage de l'air et des gaz du sol. Ce dernier permet d'ajuster le taux d'échantillonnage pour tenir compte de la résistance à la diffusion accrue, due à la présence de sol et d'eau. Cette conversion est basée sur les équations de Millington & Quirk (1961) et nécessite la connaissance de paramètres spécifiques au site, des caractéristiques des sols entourant l'EP, la porosité totale et « *water filled porosity – ou teneur volumique en eau* » du sol. Les valeurs de ces paramètres seront soit basées sur des mesures réalisées en laboratoire à partir d'échantillons prélevés sur site, soit issues de calculs ou de la littérature, et en particulier du système de classification des sols SCS⁵³ permettant de déterminer la texture en fonction de la granulométrie et de définir des valeurs par défaut pour chaque texture suite à la consultation de bases de données comme celle reprise dans US EPA (2003). La société BEACON demande une description de la lithologie sans proposer de résultats en concentration pour « *EP BeSure Sampler - BEACON* », ne jugeant pas pertinent cette formulation de la conversion de résultats de masse en concentration.

En ce qui concerne le cas des prélèvements dans les trous de sondage non équipés et obturés par un bouchon étanche (mise en place des EP dans le sol suite au fonçage manuel d'un orifice d'une profondeur de l'ordre de 50 cm), en l'absence de mesures de caractérisation spécifique des horizons lithologiques concernés (terre végétale en surface, et sol limoneux avec quelques graviers), les valeurs des paramètres du sol nécessaires sont issues de la littérature (US EPA, 2003).

3.4.2.2 Résultats

En termes de commentaires repris ci-après, il est à souligner, tenant compte des incertitudes analytiques, que la mention « de concentrations comparables ou similaires » signifie que les concentrations des EP en question et du prélèvement dynamique avec charbon sont identiques ; la mention « dans la même gamme » signifie que les facteurs de variation sont au maximum de l'ordre de 5 (avec quelques cas avec des facteurs entre 5 et 10). Dans certains cas avec une variabilité égale ou supérieure à 10, il sera indiqué « ordre de grandeur » ou d'autres facteurs seront mentionnés, comme supérieur à 10 ou plus.

Malgré l'objectif plus particulier d'une étude de screening lors de la mise en place des EP dans des trous de sondage de sub-surface non équipés et obturés par un bouchon étanche, les résultats sont cependant également présentés sous forme de diagrammes comparatifs des concentrations, également mis en perspective avec les résultats des prélèvements dynamiques avec charbon actif réalisés avant et/ou après la période des prélèvements passifs, à l'exception du « *EP BeSure Sampler - BEACON* », pour lesquels seuls des résultats en masse sont proposés par la société BEACON. Au regard des gammes de concentrations différentes dans les deux zones étudiées du site (zone des garages et zone des jardins), les résultats sont illustrés séparément sur les deux figures suivantes (Figure 15 et Figure 16).

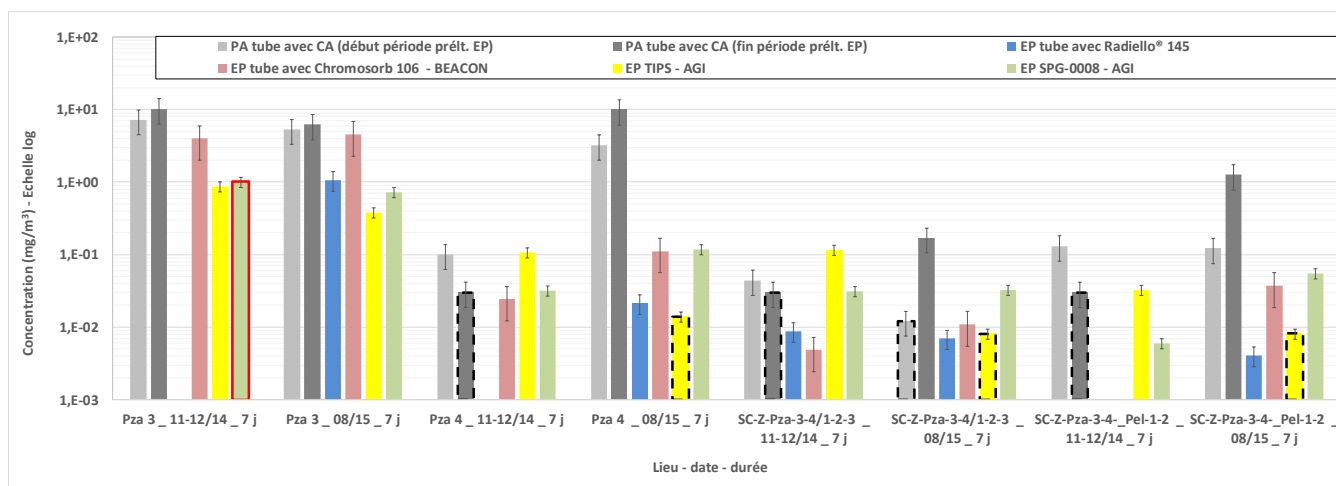
La mise en perspective avec les concentrations des prélèvements dynamiques réalisés avant et après la période d'exposition des échantillonneurs passifs est également commentée, en soulignant qu'elle s'avère plus complexe. En effet, la réalisation de mesures simultanées de prélèvements passifs et actifs ne peut pas être mise en œuvre, *a contrario* du cas des prélèvements d'air à l'intérieur du bâtiment commentés par ailleurs. Cependant, il sera considéré comme « concentrations de référence » celles issues des prélèvements dynamiques avec charbon, dans la présente étude, compte tenue de la faible variabilité temporelle dans les gaz du sol généralement⁵⁴ observée.

⁵³ SCS : Soil Classification System : le système de classification des sols le plus couramment utilisé en Amérique du nord.

⁵⁴ En effet, une variabilité plus importante (facteur de l'ordre de 10) a été observée dans certains cas dans la zone des garages entre les deux prélèvements dynamiques avec charbon actif réalisé avant et après la mise en place des EP.

Pour les gammes de concentrations de l'ordre de quelques dizaines de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au maximum de $1\ 000\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ rencontrées dans la zone des garages et des prélèvements de 7 jours, l'examen de la Figure 15 montre que :

- pour les « EP tube avec chromosorb 106 - BEACON » et « EP tube avec Radiello 145 », leurs concentrations de l'ordre de la dizaine de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sont similaires (lieu SC-Pza-3-4/1-2-3), ou une concentration mesurée avec le « EP tube avec Radiello 145 » supérieure d'un ordre de grandeur (lieu SC-Z-Pza-3-4_Pel-1-2). Lors de la mise en perspective de ces concentrations à celles des prélèvements dynamiques avec charbon, elles apparaissent systématiquement inférieures d'un facteur 5 à plus de 10 (ou de l'ordre de 10) ;
- pour les « EP SPG-0008 - AGI » et « EP TIPS - AGI », les concentrations sont soit inférieures ou supérieures à celles des « EP tube avec chromosorb 106 - BEACON » et des « EP tube avec Radiello 145 ». Il est à souligner pour la campagne de novembre/décembre 2014, des concentrations des TIPS supérieures d'un facteur de l'ordre de 5 au regard du « EP SPG-0008 - AGI », alors qu'inférieures d'un facteur *a minima* de l'ordre de 5 lors de la campagne d'août 2015. En effet, en août 2015 les concentrations des TIPS sont inférieures à la limite de quantification. Lors de la mise en perspective de ces concentrations à celles des prélèvements dynamiques avec charbon, elles apparaissent systématiquement inférieures d'un facteur 5 à plus de 10, à l'exception du cas du lieu Pza-3-4/1-2-3 lors de la campagne de novembre/décembre 2014. Ce comportement au regard des saisons de prélèvement n'apparaît pas expliqué, tenant compte notamment des conditions climatiques et environnementales.



Légende

PA : prélèvement actif ; CA : charbon actif ; EP : échantillonneur passif ;

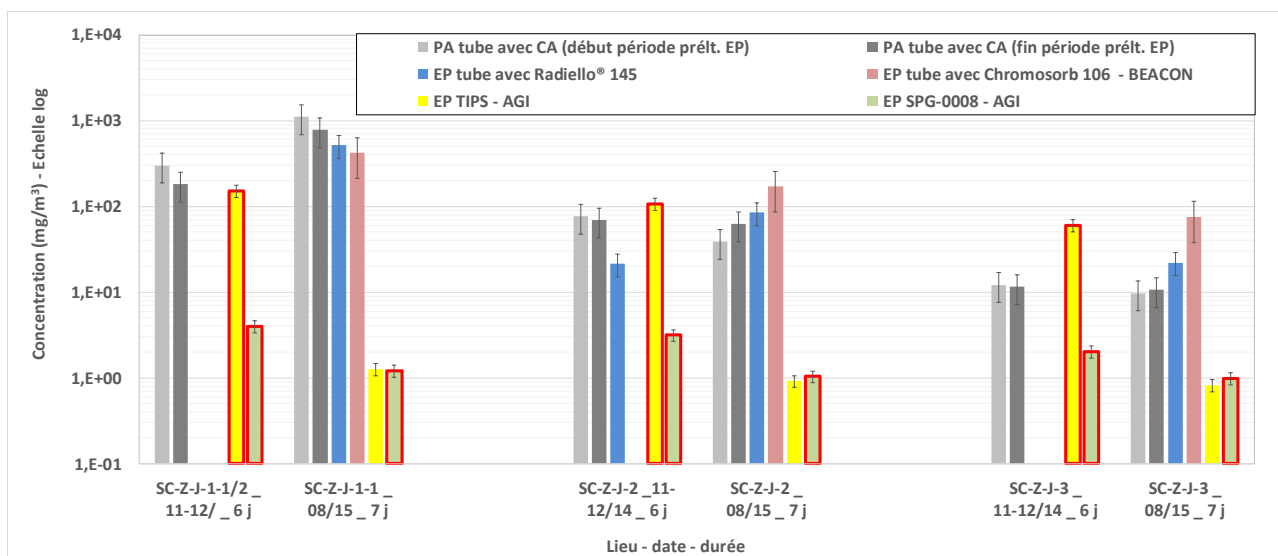
Bâtonnet avec le contour en pointillé noir : le résultat de l'analyse est estimé, compris entre la limite de détection et la limite de quantification (LQ), la valeur retenue dans la figure correspondant à la LQ ;

Bâtonnet avec le contour rouge : valeur qualifiée par le laboratoire comme une valeur estimée (masse supérieure à la gamme de calibration analytique).

FIGURE 15 - RESULTATS EN CONCENTRATION DANS LES GAZ DU SOL DES TROUS DE SONDAGE NON EQUIPES ET DES PIEZAIRES DE LA ZONE DES GARAGES

Pour les gammes de concentrations de l'ordre de quelques dizaines de mg/m^3 ou de quelques centaines de mg/m^3 , jusqu'au g/m^3 rencontrées dans la zone des jardins du site, pour le lieu SC-Z-J-1, le plus proche du piézair PZa11 siège d'une contamination significative et des prélèvements de 6 et 7 jours, l'examen de la Figure 16 montre que :

- les concentrations associées aux « EP tube avec chromosorb 106 - BEACON » et « EP tube avec Radiello 145 » sont globalement similaires, tenant compte des incertitudes analytiques (ou légèrement supérieure, d'un facteur 2 pour le premier précité dans le cas du lieu SC-Z-J-3). Ces concentrations mises en perspective avec celles associées aux prélèvements dynamiques avec charbon sont globalement du même ordre de grandeur ;
- les concentrations du « EP TIPS - AGI », en comparaison, sont plus erratiques. Ainsi, pour le prélèvement de novembre/décembre 2014 en SC-Z-J-2, la concentration est supérieure d'un facteur 4 à celle du « EP tube avec Radiello 145 », mais sinon inférieure de plus de deux ordres de grandeur, et dans ce cas, également inférieure aux concentrations des prélèvements dynamiques. Il est cependant à rappeler que certains des résultats des EP de AGI sont des valeurs qualifiées par le laboratoire comme des valeurs estimées (masse supérieure à la gamme de calibration analytique) ;
- les concentrations des « EP SPG-0008 - AGI », sont systématiquement inférieures de un à deux ordres de grandeur à celles des EP « EP tube avec chromosorb 106 - BEACON ». Il en est de même avec celles des « EP TIPS - AGI », à l'exception de la campagne d'août 2015 pour les trois lieux d'investigation qui montrent des concentrations similaires pour les « EP SPG-0008 - AGI » et « EP TIPS - AGI », mais également significativement inférieures à celles des autres EP. Il est cependant à rappeler que certains des résultats des EP de AGI sont des valeurs qualifiées par le laboratoire comme des valeurs estimées (masse supérieure à la gamme de calibration analytique).



Légende

PA : prélèvement actif ; CA : charbon actif ; EP : échantillonneur passif ;

Bâtonnet avec le contour rouge : valeur qualifiée par le laboratoire comme une valeur estimée (masse supérieure à la gamme de calibration analytique).

FIGURE 16 - RESULTATS EN CONCENTRATION DANS LES GAZ DU SOL DES TROUS DE SONDAGE NON EQUIPES DE LA ZONE DU JARDIN DU SITE

Les résultats en concentration sont synthétisés dans le Tableau 7, pour la synthèse des tendances en termes de gammes de concentration et durées d'exposition.

TABLEAU 7 - SYNTHÈSE DES MESURES EN TERMES DE GAMMES DE CONCENTRATION DANS LES GAZ DU SOL DANS LES TROUS DE SONDAGE NON EQUIPES

Concentration de « référence », PA avec CA : moyenne (début - fin des prélèvements des EP) [mg/m ³] (I.A.= 27%)	Durée d'exposition des EP [jour]	Concentration de l'EP au regard de la « concentration de référence » tenant compte des incertitudes analytiques			
		EP SPG-0008 Amplified Geochemical Imaging - AGI (USA) (I.A.= 16%)	EP TIPS (en développement) Amplified Geochemical Imaging - AGI (USA) (I.A.= 16%)	EP tube avec adsorbant chromosorb 106 BEACON Environnemental Service (USA) (I.A.= 50%)	EP tube avec adsorbant Radiello 145 (INERIS, développement interne) (I.A.= 30%)
0,037 (0,04 - <0,03)	7			(N)	
0,09 (<0,01 - 0,17)	7		(N)	(N)	(N)
0,08 (0,13 - <0,03)	7	(N)		-	-
0,69 (0,12 - 1,26)	7	(N)			
12 (12,2 - 11,5)	6	(*)	(*) (N)	-	-
72,7 (77 - 69)	6	(*)	(*)	-	-
241 (300 - 181)	6	(*)	(*)	-	-
10 (9,7 - 10,6)	7	(*) (N)	(N)		
51 (39 - 63)	7	(*)			
947 (1 114 - 779)	7	(*)			
Légende EP : échantillonneur passif ; PA : prélèvement actif ; CA : charbon actif ; I.A. : incertitude analytique ; < X : valeur inférieure à la limite de quantification égale à X ; - : EP non utilisé ; (*) : valeurs qualifiées par le laboratoire comme des valeurs estimées (masse supérieure à la gamme de calibration analytique).					
Concentration de l'EP :		similaire		variation < facteur 5 [(N) : cas avec un facteur compris entre 5 et 10]	variation > facteur 10

3.4.3 Conclusions

Dans le cadre d'une étude de screening, quels que soient les échantillonneurs passifs pour les gaz du sol, installés dans des trous de sondage non équipés, les résultats en masse indiquent une zonation identique entre les différents EP.

En ce qui concerne la mise en perspective des résultats en concentration des EP et de ceux des prélèvements dynamiques avec charbon actif dans des trous de sondage non équipés, la variabilité est généralement supérieure à un facteur 10 pour ces durées d'exposition de 6 et 7 jours et gammes de concentrations de 0,1 à plusieurs dizaines ou centaines de mg/m³. En outre, il est également à souligner que plusieurs des résultats associés aux EP de AGI sont des valeurs qualifiées par le laboratoire comme des valeurs estimées (masse supérieure à la gamme de calibration analytique).

3.5 Résultats de caractérisation des gaz du sol dans les piézairs

3.5.1 Préambule

En ce qui concerne les résultats des mesures de gaz réalisées dans des piézairs (ouvrages permanents), seuls des résultats en concentration seront commentés. En effet, la section précédente ayant déjà mis en évidence des résultats satisfaisants en termes d'étude de screening, réalisés par le biais d'ouvrages temporaires de type de trous de sondage de sub-surface non équipés et obturés par un bouchon étanche (mise en place des EP dans le sol).

Des mesures dans des piézairs sont plus particulièrement réservées pour des investigations ciblées avec des résultats en concentration.

3.5.2 Résultats en concentration

3.5.2.1 Impact de la connaissance des valeurs des paramètres spécifiques du sol pour le calcul des concentrations pour les EP de AGI

Préambule

Dans le cas des gaz du sol, *a contrario* des résultats dans l'air à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment, pour plusieurs des résultats associés aux EP de AGI®, il a été mentionné dans les bordereaux des résultats d'analyse exprimés en concentration, pour certains d'entre eux, les valeurs sont qualifiées par le laboratoire comme des valeurs estimées (masse supérieure à la gamme de calibration analytique), ces derniers étant annotés par la lettre « E ».

En termes de condition d'utilisation des échantillonneurs, parmi les éléments fournis par la société AGI pour le « EP SPG-0008 - AGI », en rappel de la section 2.6.1.2, il a été mentionné : « *lorsque la masse augmente sur l'adsorbant et approche de la saturation, des phénomènes de rétro-diffusion peuvent se produire, entraînant une diminution du taux d'échantillonnage. Finalement, la masse atteindra une valeur d'état stable maximale à toute concentration. AGI, afin d'éviter ces effets de saturation, recommande de conserver la masse totale du support en dessous de 50 µg. A partir de données expérimentales, AGI indique avoir trouvé que cette plage de sécurité peut être étendue potentiellement jusqu'à 100 µg* ».

Cependant, sur les bordereaux de résultats du projet TEMPAIR, il apparaît que les résultats en masse ou en concentration sont annotés « E » dès que la masse est supérieure à 50 µg, ces résultats étant mentionnés comme estimés.

Lors d'échanges dans le cadre de ce projet, il a également été mentionné concernant la linéarité de masse adsorbée, que l'équation utilisée pour le calcul de la concentration dans les gaz du sol, comprend des résultats jusqu'à une masse de l'ordre 170 µg et qu'il est recommandé des durées d'exposition de 3 à 5 jours pour les sols et de 24 heures pour l'air.

Ainsi, dans ces cas annotés « E », les résultats sont cependant présentés dans les illustrations suivantes tant pour le « EP SPG-0008 - AGI » que le « EP TIPS - AGI ».

Résultats

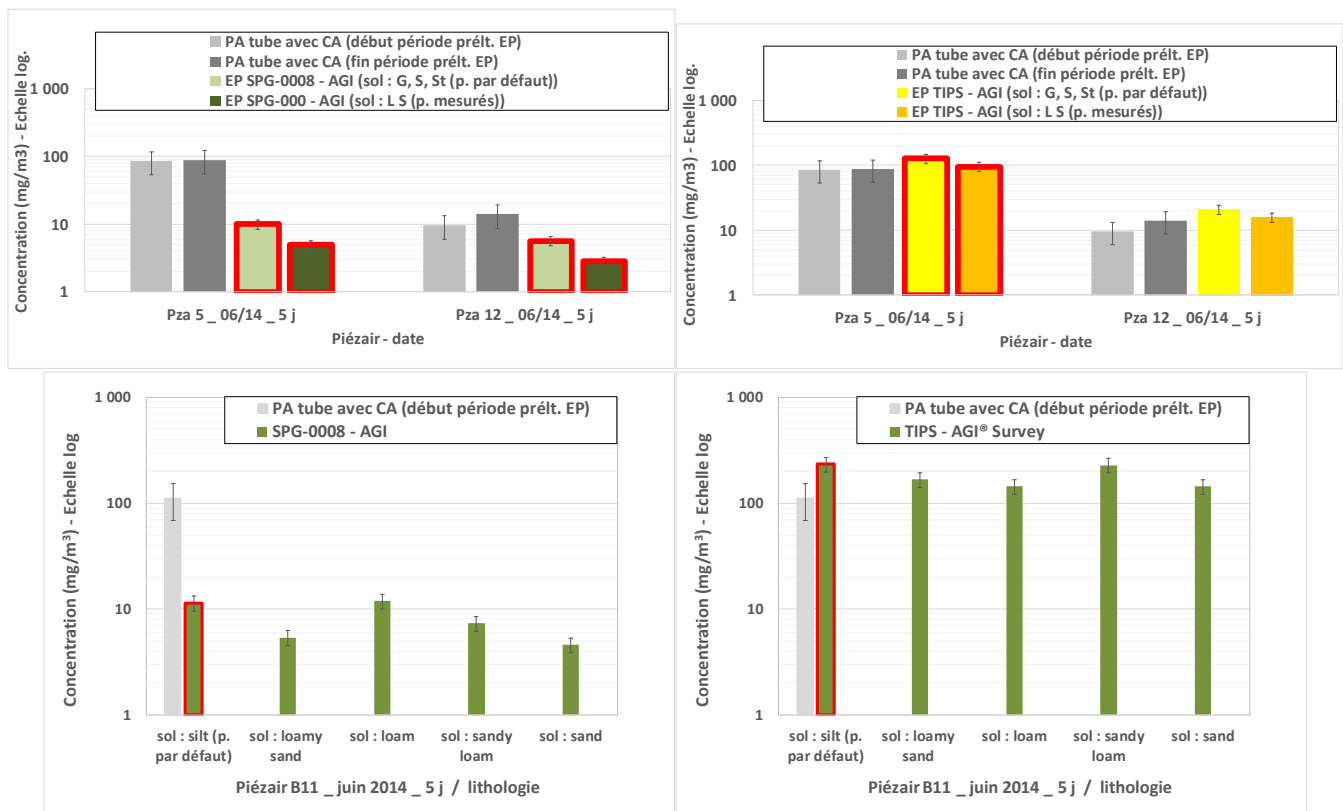
Comme précédemment mentionné en section 2.5, pour les « EP SPG-0008 - AGI » et « EP TIPS - AGI » le calcul des résultats en concentration à partir des résultats en masse nécessite l'introduction d'un facteur différenciant l'échantillonnage de l'air et des gaz du sol. Ce dernier permet d'ajuster le taux d'échantillonnage pour tenir compte de la résistance à la diffusion accrue, due à la présence de sol et d'eau. La conversion est basée sur les équations de Millington & Quirk (1961) et nécessite la connaissance de paramètres spécifiques au site, des caractéristiques des sols entourant l'EP, la porosité totale et la « water filled porosity – ou teneur volumique en eau » du sol. Les valeurs de ces paramètres seront soit basées sur des mesures réalisées en laboratoire à partir d'échantillons prélevés sur site, soit issues de calculs ou de la littérature, et en particulier du système de classification des sols SCS⁵⁵ permettant de déterminer la texture en fonction de la granulométrie et de définir des valeurs par défaut pour chaque texture suite à la consultation de bases de données comme celle reprise dans US EPA (2003).

⁵⁵ SCS : Soil Classification System : le système de classification des sols le plus couramment utilisé en Amérique du nord.

Lors de la première campagne de juin 2014, seule une description de la lithologie des horizons captés par les gaz des sols avait été fournie à la société AGI. Dans un second temps, les valeurs des paramètres spécifiques des sols issues des diagnostics réalisés dans le cadre du projet FLUXOBAT (Traverse et al. 2012) ont été communiquées.

La Figure 17 illustre en exemple, des résultats de cette campagne de juin 2014 :

- pour les piézaires Pza 5 et Pza 12, dont leurs niveaux crépinés se situent au droit d'une unique lithologie (des remblais). Pour cette figure, pour les EP, les couleurs plus claires (gris clair, vert clair et jaune) concernent les concentrations associées aux paramètres par défaut issus de la littérature pour la lithologie concernée. Les concentrations représentées en couleur plus foncée (gris foncé, vert foncé et orange) prennent en compte les valeurs de paramètres spécifiques, issues des diagnostics sur site ;
- pour le piézair B11, dont le niveau de crépine d'une épaisseur de 2,7 m recoupe plusieurs lithologies (remblais, limons et sables et graviers)⁵⁶.



Légende

PA : prélèvement actif ; CA : charbon actif ; EP : échantillonneurs passifs ; L S : Loamy Sand (sable limoneux) ; G : Gravel (gravier) ; S : Sand (sable) ; St : Silt ; p. par défaut / mesurés : paramètres par défaut / mesurés ; Bâtonnet avec le contour rouge : valeur qualifiée par le laboratoire comme une valeur estimée (masse supérieure à la gamme de calibration analytique).

FIGURE 17 - COMPARAISON DES CONCENTRATIONS CALCULEES AVEC LES VALEURS DES PARAMETRES DU SOL ISSUES DE LA LITTERATURE ET CEUX SPECIFIQUES AU SITE, POUR L'EP SPG-0008 ET TIPS DE AGI

⁵⁶ Il est à souligner que ce design particulier avait été mis en dans le cadre du projet FLUXOBAT (Traverse et al. 2012). En effet, classiquement, il est recommandé de situer la zone crépinée au droit une même lithologie, tenant compte des objectifs de l'étude.

Ces résultats montrent pour des gammes de concentration de l'ordre de quelques dizaines de mg/m^3 ou d'une centaine de mg/m^3 ⁵⁷ que :

- dans le cas des piézaires Pza 5 et Pza 12, pour les « *EP TIPS - AGI* », les concentrations calculées avec pour les paramètres caractéristiques des sols précités des valeurs par défaut issues de la littérature sur la base de la mention de la lithologie sont similaires⁵⁸ à celles calculées avec les valeurs basées sur des mesures d'échantillons du site, tenant compte des incertitudes analytiques. Dans le cas du « *EP SPG-0008 - AGI* », les concentrations sont similaires ou dans la même gamme, tenant compte des incertitudes analytiques (variabilité maximale d'un facteur de l'ordre de 3). Il est à souligner que plusieurs des résultats sont des valeurs qualifiées par le laboratoire comme des valeurs estimées (masse supérieure à la gamme de calibration analytique) ;
- dans le cas du piézair B11, tant pour le « *EP SPG-0008 - AGI* » que le « *EP TIPS - AGI* », toutes les concentrations calculées sont dans la même gamme tenant compte des incertitudes analytiques, (variabilité maximale d'un facteur de l'ordre de 3).

En conclusions, ces observations, ainsi que celles issues d'autres cas, montrent des variations de concentrations au maximum d'un facteur trois au regard du choix des valeurs des paramètres des sols nécessaires aux calculs de conversion des résultats de masses en concentrations.

Cependant, malgré ce retour d'expérience sur le site pilote du projet TEMPAIR et ses spécificités, il est recommandé dans le cas de la prise en compte de résultats en concentration dans une étude, de disposer de valeurs spécifiques des paramètres du sol, basées sur des échantillons du site, en soulignant la nécessité d'intégrer également les incertitudes métrologiques associées, et la représentativité au regard des conditions météorologiques, et notamment l'influence de la pluie, outre les caractéristiques des sols, des recouvrements.

En effet, d'après la littérature citée en section 2.5 et de la Figure 10, des variations plus importantes peuvent être attendues, et donc des impacts plus importants sur les gammes de concentrations calculées.

Par ailleurs, en termes de résultats, il peut déjà être mentionné que les concentrations issues des prélèvements avec les « *EP TIPS - AGI* » sont supérieures d'un facteur 5 à 10 à celles des « *EP SPG-0008 - AGI* ». D'autres commentaires sont présentés ultérieurement, tenant compte des résultats des autres EP mis en œuvre et des prélèvements dynamiques avec charbon actif.

3.5.2.2 Comportements des EP en fonction des gammes de concentrations

Les réponses des différents échantillonneurs, toutes campagnes confondues, sont illustrées sur la Figure 18 et Figure 19 (pour des durées d'exposition de 5 et 7 jours⁵⁹), les gammes de concentrations étant différentes.

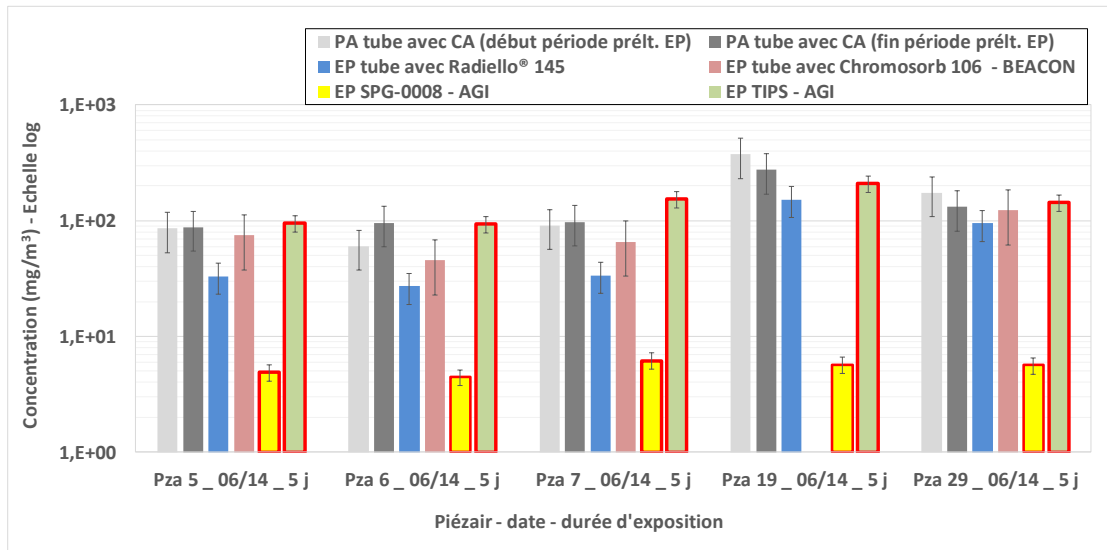
La mise en perspective avec les concentrations des prélèvements dynamiques réalisés avant et après la période d'exposition des échantillonneurs passifs est également commentée, en soulignant qu'elle s'avère plus complexe. En effet, la réalisation de mesures simultanées de prélèvements passifs et actifs ne peut pas être mise en œuvre, a contrario du cas des prélèvements d'air à l'intérieur du bâtiment commentés précédemment. Cependant, il sera considéré comme « concentrations de référence », celles issues des prélèvements dynamiques avec charbon, compte tenu de la faible variabilité temporelle observée dans les gaz du sol comme précédemment mentionné.

⁵⁷ Ces gammes de concentration sont celles observées par les TIPS de AGI Survey, similaires à celles mesurées lors des prélèvements dynamiques avec charbon actif.

⁵⁸ En termes de commentaires, tenant compte des incertitudes analytiques, il est à rappeler que la mention « de concentrations comparables ou similaires » signifie que les concentrations des EP en question et du prélèvement dynamique avec charbon sont « identiques » ; la mention « dans une même gamme » signifie que les facteurs de variation sont au maximum de l'ordre de 5 (avec quelques cas avec des facteurs entre 5 et 10). Dans les autres cas avec une variabilité égale ou supérieure à 10, il sera indiqué « ordre de grandeur » ou d'autres facteurs seront mentionnés, comme supérieur à 10 ou plus.

⁵⁹ Pour les durées de prélèvement plus faibles de 1 et 2 jours (Pza 12) et inférieure à 1 jour (Pza 8) lors de la campagne de juin 2015, les résultats ne sont pas commentés dans ce document. Pour rappel, l'objectif initial de la mise en œuvre de supports passifs est la réalisation de prélèvements de durées d'exposition de plusieurs jours.

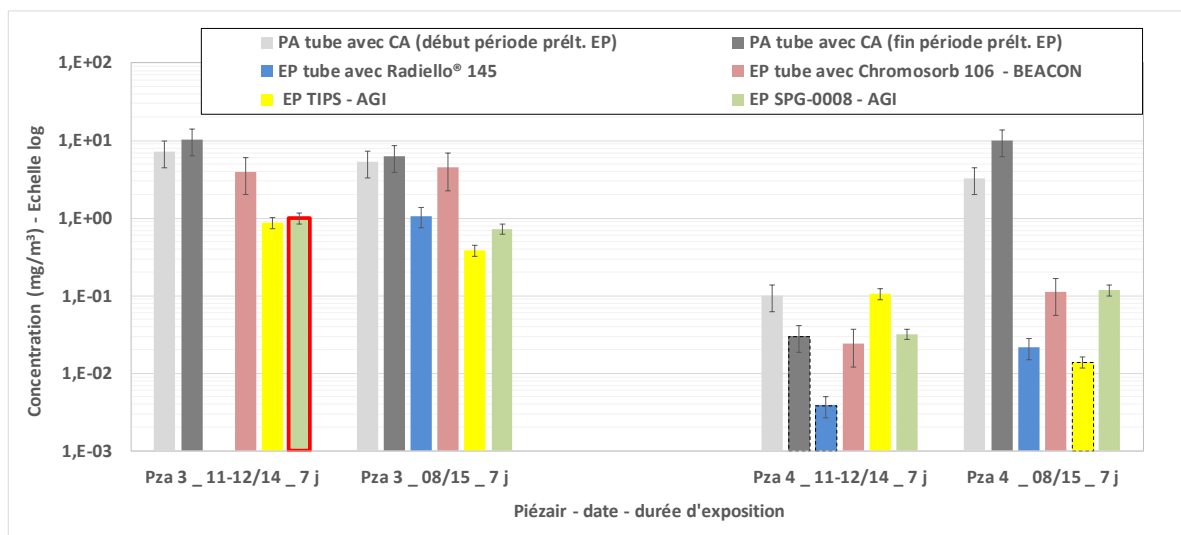
Les résultats sont également repris dans le Tableau 8, pour la synthèse des tendances en termes de gammes de concentrations, dans le cas des « EP SPG-0008 - AGI » et « EP TIPS - AGI ». Les valeurs qualifiées par le laboratoire comme des valeurs estimées (masse supérieure à la gamme de calibration analytique) sont également indiquées.



Légende

PA : prélèvement actif ; CA : charbon actif ; EP : échantillonneurs passifs ;
 Bâtonnet avec le contour rouge : valeur qualifiée par le laboratoire comme une valeur estimée (masse supérieure à la gamme de calibration analytique).

FIGURE 18 - COMPARAISON DES CONCENTRATIONS OBSERVEES POUR LES ECHANTILLONNEURS PASSIFS ET ACTIFS EN DEBUT ET FIN DE PRELEVEMENT PASSIFS DANS LES PIEZAIRES AU DROIT DU SITE PILOTE



Légende

PA : prélèvement actif ; CA : charbon actif ; EP : échantillonneurs passifs ;
 Bâtonnet avec le contour en pointillé : le résultat de l'analyse est estimé, compris entre la limite de détection et la limite de quantification (LQ), la valeur retenue dans la figure correspondant à la LQ ;
 Bâtonnet avec le contour rouge : valeur qualifiée par le laboratoire comme une valeur estimée (masse supérieure à la gamme de calibration analytique).

FIGURE 19 - COMPARAISON DES CONCENTRATIONS OBSERVEES POUR LES ECHANTILLONNEURS PASSIFS, ET ACTIFS EN DEBUT ET FIN DE PRELEVEMENTS PASSIFS, DANS LES PIEZAIRES AU DROIT DE LA ZONE DES GARAGES

Pour les gammes de concentrations de l'ordre de plusieurs centaines de mg/m³ (et une durée d'exposition de 7 jours) :

- les concentrations des « *EP tube avec Radiello 145* » et « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » sont globalement similaires, tenant compte des incertitudes analytiques, ainsi qu'avec celles des prélèvements dynamiques sur charbon actif ;
- les concentrations des « *EP TIPS - AGI* » sont globalement similaires à celles des « *EP tube avec Radiello 145* » et des « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » et à celles des prélèvements dynamiques sur charbon actif, tenant compte des incertitudes analytiques, dans le cas des piézairs Pza 19 et 29. Pour les autres piézairs, les concentrations sont supérieures d'un facteur de 2 à 5 jusqu'à 10, à celles des « *EP tube avec Radiello 145* » et « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » et des prélèvements dynamiques sur charbon actif réalisés avant et après les prélèvements des EP, plus particulièrement dans le cas du piézair Pza13 ;
- les concentrations des « *EP SPG-0008 - AGI* » sont systématiquement inférieures d'un ordre de grandeur à celles des autres échantillonneurs passifs, ainsi qu'à celles des prélèvements dynamiques sur charbon actif réalisés avant et après ;
- par contre, pour une durée d'exposition de 5 jours, et des gammes de concentrations de l'ordre de 100 mg/m³, les concentrations du « *EP TIPS - AGI* » et « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » sont globalement similaires aux concentrations mesurées par les prélèvements dynamiques avec charbon. Les concentrations avec le « *EP SPG-0008 - AGI* » et le « *EP tube avec Radiello 145* » restent globalement dans la même gamme concentrations mesurées par les prélèvements dynamiques sur charbon actif.

Pour les gammes de concentrations de l'ordre de quelques dizaines de mg/m³ (et une durée d'exposition de 7 jours) :

- les tendances sont globalement semblables à celles décrites ci-dessus. Il apparaît cependant des écarts de concentration légèrement en dehors des bornes des incertitudes analytiques dans le cas du piézair Pza 3, et plus marqués dans le cas du piézair Pza 4, qui montre également des concentrations plus faibles (de l'ordre de quelques mg/m³ pour les échantillonneurs passifs) ;
- par contre, pour des durées d'exposition de 1 et 2 jours et des concentrations de quelques dizaines de mg/m³, jusqu'à une centaine de mg/m³, seul le « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » et dans certains cas le « *EP tube avec Radiello 145* », donnent des résultats globalement dans la gamme des concentrations mesurées par les prélèvements dynamiques sur charbon actif, pour les autres échantillonneurs, elles sont inférieures.

Pour les gammes de concentrations de quelques de mg/m³ (et une durée d'exposition de 7 jours) :

- les concentrations mesurées avec les différents EP utilisés sont très erratiques et globalement inférieures d'un ordre de grandeur aux concentrations mesurées par les prélèvements dynamiques avec charbon, à l'exception du « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » et du « *EP tube avec Radiello 145* » pour un seul prélèvement. En outre, dans le cas des EP de AGI, plusieurs des résultats sont des valeurs qualifiées par le laboratoire comme des valeurs estimées (masse supérieure à la gamme de calibration analytique).

Pour les gammes de concentrations de quelques dizaines de µg/m³ (et une durée d'exposition de 7 jours) :

- les concentrations sont globalement similaires aux concentrations mesurées par les prélèvements dynamiques sur charbon actif, à l'exception du « *EP tube avec Radiello 145* » avec une concentration inférieure à la limite de quantification mais probablement liée à un problème lors de l'analyse.

Il est important de souligner que l'« *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » donne globalement pour toutes les gammes de concentrations des valeurs similaires à celles des prélèvements dynamiques avec charbon actif.

Il est à noter que la section précédente concernant l'air à l'intérieur et l'extérieur du bâtiment, avait déjà mis en évidence que les concentrations associées au « *EP SPG-0008 - AGI* » étaient globalement inférieures aux concentrations du « *EP TIPS - AGI* » et des autres échantillonneurs passifs, et à celles des prélèvements dynamiques avec charbon actif réalisés avant et après les prélèvements des EP.

Il est également à souligner que la mise en évidence de concentrations pour les « *EP SPG-0008 - AGI* » inférieures à celles du « *EP TIPS - AGI* » avait déjà été observée dans le cadre du projet PassSolAir (INERIS, 2017), notamment dans le cadre des tests réalisés en chambre contrôlée pour des durées d'exposition s'échelonnant entre 2 et 7 jours, sur un seul test, ce qui limite la comparaison des résultats de PassSolAir à ceux de TEMPAIR en termes de durées d'exposition.

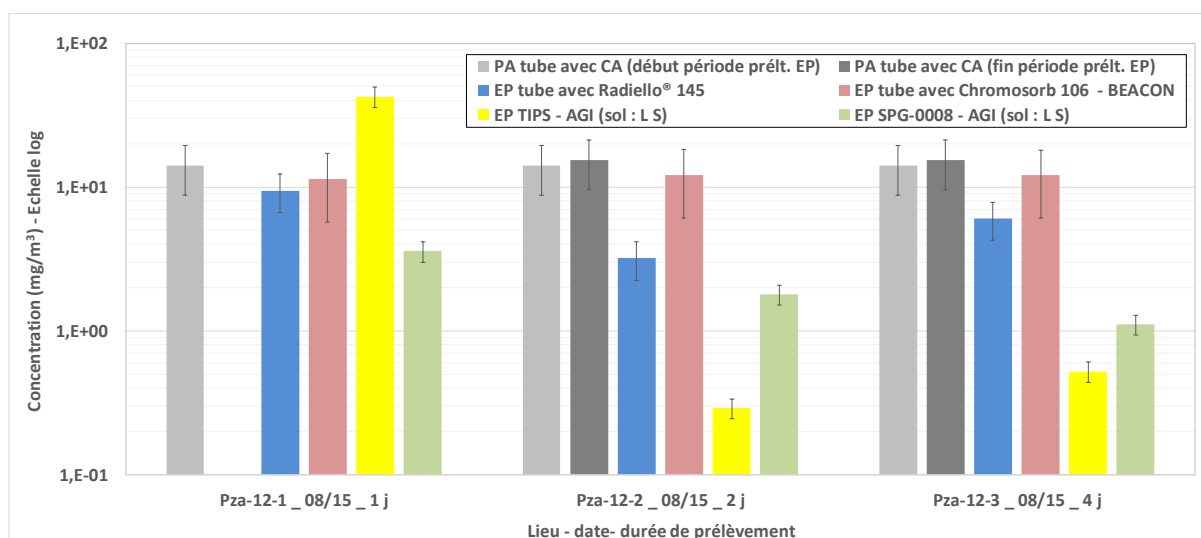
Il est cependant à souligner que certains des résultats des EP de AGI sont des valeurs qualifiées par le laboratoire comme des valeurs estimées (masse supérieure à la gamme de calibration analytique).

TABLEAU 8 - SYNTHÈSE DES MESURES EN TERMES DE GAMMES DE CONCENTRATION DANS LES GAZ DU SOL DANS LES PIEZAIRES

Concentration de « référence », PA avec CA : moyenne (début - fin des prélèvements des EP) [mg/m ³] (I.A.= 27%)	Durée d'exposition des EP [jour]	Concentration des EP [mg/m ³]						
		EP SPG-0008 <i>Amplified Geochemical Imaging - AGI (USA)</i> (I.A.= 16%)	EP TIPS (en développement) <i>Amplified Geochemical Imaging - AGI (USA)</i> (I.A.= 16%)	EP tube avec adsorbant chromosorb 106 <i>BEACON Environnemental Service (USA)</i> (I.A.= 50%)	EP tube avec adsorbant Radiello 145 <i>(INERIS, développement interne)</i> (I.A.= 30%)			
117 (104 - 130)	1	35 (*)	14	110	253			
14,7 (14 -)	1	3,6	43	11	9,4			
14,7 (14 - 15)	2	1,8 (N)	0,3	12	3,2			
14,7 (14 - 15)	4	1,1 (N)	0,5	12	6,1			
11,7 (9 - 14)	5	2,8 - 5,6 (*)	16 - 21		10	4,9		
89 (85 - 92)		4,4 (*)	9,9 (*) (N)	127 (*)	207 (*)	46	75	27 - 34
152 (174 - 131)		5,6 (*) - 12 (*)		144 (*) - 193 (*)		124		95
324 (373 - 275)		5,7 (*) - 13 (*)		209 (*) - 462 (*)		-		151
0,06 (0,10 - <0,03)	7	0,03	0,1		0,02		-	
5,7 (5,3 - 6,2)		0,7 (N)	0,4 (N)		4,5		1,1	
6,5 (3,2 - 10)		0,1	0,01		0,1		0,02	
9,0 (7,2 - 11)		1 (*) - 1,6 (N)		0,9 - 37 (*)		3,9		9,1 (**)
54 (59 - 49)		-		38 (*)		17		29 (**)
Légende								
EP : échantillonneur passif ; PA : prélèvement actif ; CA : Charbon actif ; I.A. : incertitude analytique ; < X : valeur inférieure à la limite de quantification égale à X ; - : EP non utilisé ;								
(*) : valeurs qualifiées par le laboratoire comme des valeurs estimées (masse supérieure à la gamme de calibration analytique) ;								
(**) : valeurs qualifiées par le laboratoire comme des valeurs estimées (sur ou sous-estimation potentielle au regard de la capacité de l'adsorbant Radiello 145).								
Concentration de l'EP au regard de la « concentration de référence » tenant compte des incertitudes analytiques :								
similaire		variation < facteur 5 [(N) : cas avec un facteur compris entre 5 et 10]			variation > facteur 10			

3.5.2.3 Comportements des EP en termes de durées d'exposition

Pour rappel du plan d'échantillonnage, lors de la campagne d'août 2015, un test, illustré sur la Figure 20, avait été conduit en Pza 12, associé à trois périodes d'exposition successives de durées différentes de 1, 2 et 4 jours, dont les résultats sont présentés et mis également en perspective avec les concentrations mesurées lors des prélèvements dynamiques.



Légende

PA : prélèvement actif ; CA : charbon actif ; EP : échantillonneurs passifs ; L S : Loamy Sand.

FIGURE 20 - COMPARAISON DES CONCENTRATIONS OBSERVEES EN PZA12 POUR TROIS DUREES SUCCESSIVES DE PRELEVEMENT POUR LES ECHANTILLONNEURS PASSIFS, ET ACTIFS EN DEBUT ET FIN DE PRELEVEMENTS PASSIFS

Pour une gamme de concentrations de l'ordre de 10 mg/m^3 , les tendances sont différentes en fonction des EP mis en œuvre et tenant compte des incertitudes analytiques sont les suivantes pour des durées d'exposition de :

- **4 jours :**
 - le « EP tube avec chromosorb 106 - BEACON » et le « EP tube avec Radiello 145 », montrent des concentrations similaires, la concentration du premier EP cité étant légèrement plus faible que celle du second ; leurs concentrations sont également semblables à celles issues des prélèvements dynamiques avec charbon actif, et juste inférieures aux bornes des incertitudes analytiques dans le cas du « EP tube avec Radiello 145 » ;
 - en ce qui concerne les EP de AGI, tant les concentrations du « EP TIPS - AGI » que du « EP SPG-0008 - AGI », elles apparaissent inférieures de plus d'un ordre de grandeur à celles des autres EP, ainsi qu'à celles issues des prélèvements dynamiques avec charbon actif ; la concentration la plus basse étant dans ce cas associée au « EP TIPS - AGI » ;
- **2 jours :**
 - la différence entre les résultats du « EP tube avec chromosorb 106 - BEACON » et du « EP tube avec Radiello 145 », est plus marquée, en dehors des incertitudes analytiques, et de l'ordre d'un facteur 3 ;
 - le premier cité montrant la valeur la plus élevée ;
 - cette dernière concentration se situe dans la même gamme que les concentrations des prélèvements dynamiques avec charbon actif ;
- **1 jour :**
 - les concentrations des « EP tube avec chromosorb 106 - BEACON » et « EP tube avec Radiello 145 » sont quasi identiques ;

- elles sont également du même ordre que celle du prélèvement dynamique réalisé sur charbon ;
- dans le cas de cette durée d'exposition, le « *EP TIPS - AGI* » indique une concentration supérieure de l'ordre d'un facteur 4 à celles des « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » et « *EP tube avec Radiello 145* », alors que pour la concentration du « *EP SPG-0008 - AGI* » est inférieure d'un facteur de l'ordre de 6.

3.5.3 Conclusions

Pour rappel, les campagnes de tests dans les trous de sondage non équipés, avec pour objectif premier une évaluation des EP pour une étude de screening (résultats en masse), concernaient des durées d'exposition de 6 et 7 jours et des gammes de concentrations de quelques dizaines à une centaine de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dans la zone des garages, et de quelques dizaines à centaines de mg/m^3 .

Les campagnes menées sur des EP pour les gaz du sol dans des piézaires apportent des éléments d'informations complémentaires à ceux présentés dans la section relative aux tests avec les EP mis en œuvre dans les trous de sondage non équipés, en termes :

- d'objectif d'étude (résultats en concentration),
- de durées d'exposition et de gammes de concentrations différentes,
- et d'impact potentiel de la présence d'un volume d'air plus important entourant le EP au regard de l'utilisation de la formulation d'ajustement du taux d'échantillonnage pour la conversion de la masse en concentration dans le cas de EP de AGI.

Il apparaît, tenant compte des incertitudes analytiques, les tendances suivantes en termes de variabilité⁶⁰ pour différentes gammes de concentration en PCE par rapport aux prélèvements dynamiques sur charbon actif pris comme référence.

Pour des faibles concentrations, de quelques dizaines de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à une centaine de $\mu\text{g}/\text{m}^3$, et une durée d'exposition de 7 jours, les concentrations associées aux « *EP SPG-0008 - AGI* », « *EP TIPS - AGI* » et « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » sont dans la même gamme que les concentrations mesurées avec les prélèvements dynamiques sur charbon actif.

Pour les concentrations de l'ordre de quelques mg/m^3 à $10 \text{ mg}/\text{m}^3$, et une durée d'exposition de 7 jours, à l'exception du « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » pour lequel certaines concentrations sont similaires à celles mesurées avec les prélèvements dynamiques sur charbon actif ; seules les concentrations de l'ordre de $10 \text{ mg}/\text{m}^3$ mesurées avec les prélèvements dynamiques sur charbon actif, sont également du même ordre de grandeur pour les 4 échantillonneurs passifs, « *SPG-0008 - AGI* », « *EP TIPS - AGI* », « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » et « *EP tube avec Radiello 145* ». Pour les concentrations de l'ordre de quelques mg/m^3 mesurées avec les prélèvements dynamiques sur charbon actif, celles des échantillonneurs passifs sont inférieures de 1 à 2 ordres de grandeur.

Pour des concentrations de l'ordre de 10 à $50 \text{ mg}/\text{m}^3$ et des durées d'exposition de 2 à 5 jours, seul le « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » montre des concentrations similaires pour toutes les durées d'exposition.

Ainsi au regard des gammes de concentration rencontrées et des durées d'exposition étudiées, ce projet montre que :

- les concentrations associées aux « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » et aux « *EP tube avec Radiello 145* » sont globalement similaires ou dans la même gamme que celles mesurées lors des prélèvements dynamiques sur charbon actif, à quelques exceptions près,
- pour les échantillonneurs de AGI et pour les durées d'exposition de plusieurs jours, les concentrations du « *EP TIPS - AGI* » sont également du même ordre de grandeur que celles des prélèvements dynamiques sur charbon actif, avec dans certains cas cependant des valeurs supérieures, alors que le « *EP SPG-0008 - AGI* » sous-estime majoritairement les concentrations, jusqu'à un ordre de grandeur. Une sous-

⁶⁰ En termes de commentaires, tenant compte des incertitudes analytiques, il est à rappeler que la mention « de concentrations comparables ou similaires » signifie que les concentrations des EP en question et du prélèvement dynamique avec charbon sont « identiques » ; la mention « dans une même gamme » signifie que les facteurs de variation sont au maximum de l'ordre de 5 (avec quelques cas avec des facteurs entre 5 et 10). Dans les autres cas avec une variabilité égale ou supérieure à 10, il sera indiqué « ordre de grandeur » ou d'autres facteurs seront mentionnés, comme supérieur à 10 ou plus.

estimation est également observée pour le « *EP TIPS - AGI* » dans le cas des courtes durées d'exposition. Cependant il est à rappeler que certains des résultats des EP de AGI sont des valeurs qualifiées par le laboratoire comme des valeurs estimées (masse supérieure à la gamme de calibration analytique).

Ainsi, plus particulièrement :

- **Pour la durée d'exposition de 7 jours et des concentrations de :**
 - **quelques dizaines de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à une centaine de $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , les concentrations sont globalement du même ordre de grandeur que les concentrations mesurées par des prélèvements dynamiques sur charbon actif ;
 - **quelques mg/m^3** , les concentrations mesurées avec les différents échantillonneurs utilisés sont très erratiques et globalement inférieures d'un ordre de grandeur aux concentrations mesurées par des prélèvements dynamiques sur charbon actif, à l'exception du « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » et du « *EP tube avec Radiello 145* » pour un seul prélèvement ;
 - **l'ordre de la dizaine de mg/m^3** , les concentrations mesurées avec l'ensemble des EP utilisés sont globalement du même ordre de grandeur que les concentrations mesurées avec des prélèvements dynamiques sur charbon actif.
- **Pour la durée d'exposition de 5 jours, mais des gammes de concentrations plus élevées, de l'ordre de $100 \text{ mg}/\text{m}^3$** , les concentrations du « *EP TIPS - AGI* » et du « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » sont globalement similaires aux concentrations mesurées par des prélèvements dynamiques sur charbon actif. Quant aux concentrations avec le « *EP SPG-0008 - AGI* » et le « *EP tube avec Radiello 145* », elles restent globalement dans la même gamme concentrations mesurées par des prélèvements dynamiques sur charbon actif.
- **Par contre pour des durées d'exposition de 1 et 2 jours et des concentrations de quelques dizaines à une centaine de mg/m^3** , seul le « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » et dans certains cas le « *EP tube avec Radiello 145* », donnent des résultats globalement dans la gamme des concentrations mesurées par des prélèvements dynamiques sur charbon actif. Pour les autres échantillonneurs, elles sont inférieures.

En conclusion, le « *EP TIPS - AGI* » et le « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » apparaissent appropriés pour des gammes de concentrations de l'ordre de la centaine de mg/m^3 et des durées d'exposition de 5 à 7 jours, également de 1 à 4 jours pour le second cité. Pour le « *EP tube avec Radiello 145* », les résultats restent globalement satisfaisants. Quant au « *EP SPG-0008 - AGI* », il apparaît peu approprié quelles que soient les gammes de concentration et les durées d'exposition étudiées dans le projet.

Il est cependant à souligner que dans plusieurs cas, les résultats sont des valeurs qualifiées par le laboratoire comme des valeurs estimées (masse supérieure à la gamme de calibration analytique).

Il est également à souligner que la mise en évidence de concentrations pour les « *EP SPG-0008 - AGI* » inférieures à celles du « *EP TIPS - AGI* », avait déjà été observée dans le cadre du projet PassSolAir (INERIS, 2017), notamment dans le cadre des tests réalisés en chambre contrôlée pour des durées d'exposition s'échelonnant entre 2 et 7 jours. La mise en œuvre d'un seul test, limite la comparaison des résultats de PassSolAir à ceux de TEMPAIR en termes de durées d'exposition.

Une question reste toutefois posée : quelle est la validité des résultats quantitatifs dans les gaz du sol et particulièrement dans le cas des EP de AGI, avec pour ces derniers, l'introduction du facteur d'ajustement du taux d'échantillonnage pour la conversion des résultats, de la masse en concentration, ce facteur dépendant de caractéristiques du sol entourant l'EP et du choix des valeurs associées ?

Dans le cadre de ce travail, l'impact potentiel du volume d'air et de sol entourant directement l'EP n'a pu être mis en évidence, malgré l'acquisition de résultats d'une part avec des EP placés directement dans des trous de sub-surface (présence d'un volume d'air entourant l'EP très faible), et d'autre part dans le tubage du piézair (présence d'un volume d'air plus important).

3.6 Apports des mesures réalisées dans l'air (adsorption mieux maîtrisée) sur l'expression des résultats en concentration des gaz du sol

Comme précédemment mentionné en section 3.1, le choix de ce milieu dans lequel l'adsorption est mieux maîtrisée que dans les gaz du sol, a été retenu afin de permettre de confirmer ou infirmer les tendances observées dans les gaz du sol.

Les mêmes EP que ceux utilisés pour les prélèvements de gaz du sol ont été mis en œuvre, ainsi que le « *EP corps diffusif avec Radiello 145* »⁶¹.

Des informations complémentaires apportées par les résultats des expérimentations réalisées dans l'air, avec des gammes de concentrations en PCE allant de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à $700 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et des durées d'exposition de 1, 2, 6 ou 8 jours, détaillés en Annexe 3, il ressort que pour :

- **des faibles concentrations, de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$, et une durée d'exposition de 6 jours**, les concentrations mesurées avec l'ensemble des échantillonneurs utilisés sont globalement similaires et dans la gamme des concentrations mesurées par des prélèvements dynamiques sur charbon actif. Pour la durée de 8 jours, toutes les concentrations sont dans la même gamme de valeurs ;
- **des concentrations plus élevées, de l'ordre de plusieurs centaines de $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , et les mêmes durées d'exposition (6 et 8 jours), tous les échantillonneurs indiquent des concentrations similaires à l'exception du « *EP SPG-0008 - AGI* » ;
- **des concentrations, de quelques dizaines de $\mu\text{g}/\text{m}^3$, et les durées d'exposition de 1 et 2 jours**, seuls les « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » et « *EP corps diffusif avec adsorbant Radiello 145* », donnent des résultats similaires et dans la gamme des concentrations mesurées par des prélèvements dynamiques sur charbon actif. Pour les autres échantillonneurs, elles sont dans la même gamme de concentrations, à l'exception du « *EP TIPS - AGI* » avec des valeurs inférieures.

En conclusion dans l'air,

- le « *EP TIPS - AGI* » n'apparaît pas approprié pour la caractérisation de faibles concentrations de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pendant ces faibles durées d'exposition dans l'air. Il est à rappeler que ce dernier, en développement, a pour objectif la caractérisation de gammes de concentrations plus élevées et durées d'exposition plus longues ;
- le « *EP SPG-0008 - AGI* » sous-estime les concentrations dans des gammes moyennes de concentration de $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et des durées d'exposition de 6 à 8 jours ;
- les résultats associés aux « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » et « *EP tube avec Radiello 145* » apparaissent globalement satisfaisants quelles que soient les durées et gammes de concentration dans l'air.

3.7 Apports des mesures réalisées dans le cadre du projet PassSolAir

Dans le cadre du projet PassSolAir (ADEME, INERIS, 2017), outre des mesures réalisées sur un site piloté, des tests en « chambre contrôlée » (chambre INERIS) avec le contrôle de la température, de l'humidité avaient été conduits pour des gammes de température et humidité, et de concentrations couramment rencontrées dans les gaz du sol et dans cette première étude principalement pour une durée de 2 jours d'exposition.

Dans le cas de ces expérimentations, la démarche de calcul des concentrations des EP a considéré un milieu air (cf. section 2.5).

Ainsi, afin, d'illustrer les résultats associés à d'autres gammes de concentration et durées d'exposition, le Tableau 9 en présente la synthèse.

Il apparaît pour ces conditions d'expérimentations pour tous les résultats des EP des concentrations similaires ou avec des variations inférieures à un facteur 5 au regard de la concentration de référence (prélèvement dynamique avec charbon actif), aux exceptions suivantes près.

⁶¹ Le corps diffusif avec adsorbant Radiello 145 n'a pas été mis en œuvre pour les prélèvements de gaz du sol dans le cadre de ce projet, mais cela pourrait être envisageable dans le cas de prélèvement par le biais d'un piézair.

Pour les durées d'exposition testées, de 2 jours et pour des gammes de concentration supérieures à 5 mg/m³, les variations dépassent ce facteur pour les résultats des « EP SPG-0008 - AGI », qualifiés par ailleurs par la société AGI comme des valeurs estimées (masse supérieure à la gamme de calibration analytique). Il est à souligner que la gamme entre 0,1 mg/m³ et 5 mg/m³ n'a pas été testée. En ce qui concerne le « EP TIPS - AGI », pour des gammes de concentration de 600 mg/m³, il apparaît également une variation supérieure à un facteur 10, et un résultat qualifié par le laboratoire comme une valeur estimée (la masse excédant la limite supérieure de calibration analytique). La gamme entre 40 mg/m³ et 600 mg/m³ n'a pas été testée.

TABLEAU 9 - SYNTHÈSE DES MESURES EN TERMES DE GAMMES DE CONCENTRATION EN PCE ISSUES DES TESTS EN CHAMBRE A ATMOSPHERE CONTROLÉE DU PROJET PASSOLAIR

Concentration de « référence », PA avec CA [mg/m ³] (I.A.= 27%)	Durée d'exposition des EP [jour]	Concentration de l'EP au regard de la « concentration de référence » tenant compte des incertitudes analytiques					Autres conditions	
		EP SPG-0008 <i>Amplified Geochemical Imaging - AGI (USA)</i> (I.A.= 16%)	EP TIPS (en développement) <i>Amplified Geochemical Imaging - AGI (USA)</i> (I.A.= 16%)	EP tube avec adsorbant chromosorb 106 <i>BEACON Environnemental Service (USA)</i> (I.A.= 5%)	EP tube avec adsorbant Radiello 145 <i>(INERIS, développement interne)</i> (I.A.= 30%)	EP corps diffusif avec adsorbant Radiello 145 (I.A.= 30%)	T. moy. (°C)	H. moy. (%)
0,05	7						10	60
0,05	2						10	60
0,11						-	20	86
5		(*)					10	70
14		(*) (N)					10	70
40		(*)					12	81
612		(*)		(*)			10	70
Légende								
EP : échantillonneur passif ; PA : prélèvement actif ; CA : charbon actif ; I.A. : incertitude analytique ; - : EP non utilisé ; T. moy. : température moyenne ; H. moy. : humidité moyenne ; (*) : valeurs qualifiées par le laboratoire comme des valeurs estimées (masse supérieure à la gamme de calibration analytique).								
Concentration de l'EP :								
similaire		variation < facteur 5 [(N) : cas avec un facteur compris entre 5 et 10]			variation > facteur 10			

4. Enseignements généraux pour une utilisation appropriée des échantillonneurs passifs

4.1 Sélection de l'échantillonneur passif

La sélection de l'échantillonneur passif pour les gaz du sol est fonction :

- des objectifs de l'étude (screening, diagnostic, surveillance, évaluation des expositions, etc.) vis-à-vis de l'intégration temporelle souhaitée et du type de résultats nécessaires, en masse ou en concentration (les résultats en concentration n'étant pas fournis pour tous les EP),
- des caractéristiques de l'EP tenant compte des spécificités du site (substances, concentrations attendues, durées d'exposition souhaitées, etc.) et de leur géométrie (taux d'échantillonnage, capacité d'adsorption, gammes de validité, etc.), pour lesquelles des échanges avec les fournisseurs⁶² sont primordiaux.

4.2 Avantages généraux des échantillonneurs passifs pour les gaz du sol

En termes de mise en œuvre, tant pour les prélèvements d'air à l'intérieur ou l'extérieur d'un bâtiment, que pour les gaz du sol dans un trou de sondage de sub-surface non équipés, de faible diamètre (suffisant pour la mise en place des EP) et obturés par un bouchon étanche ou dans un piézair, les échantillonneurs passifs testés sont très simples d'utilisation, et rapides à mettre en œuvre, particulièrement dans le cas d'étude de screening des gaz du sol avec la mise en place des EP dans le sol après le fonçage d'un orifice d'une profondeur de l'ordre de 50 cm.

Aucun équipement supplémentaire ni aucune source d'énergie extérieure n'est nécessaire sur le terrain. Pour rappel, les prélèvements dynamiques nécessitent également un contrôle du débit des pompes et en cas de prélèvement de longue durée, généralement de plus de 8 heures, une source d'énergie.

En termes de conditionnement, selon les fournisseurs, le « EP SPG-0008 - AGI », le « EP TIPS - AGI », le « EP BeSure Sampler – BEACON » n'ont pas besoin d'être conservés ou transportés dans des conditions particulières (ni au froid, ni à l'abri de la lumière) mais simplement dans leur flacon en verre fermé hermétiquement. Pour ceux de BEACON et AGI, les tests réalisés par les fournisseurs indiquent l'absence d'impact lié au transport dans ces conditions.

En termes de caractéristiques spécifiques des EP, outre la mise en œuvre sur des durées plus longues que les prélèvements dynamiques ou par aspiration naturelle, les avantages suivants sont à souligner :

- en présence de sols peu perméables, pour lesquels la réalisation d'un prélèvement dynamique est problématique, les échantillonneurs passifs s'avèrent intéressants,
- dans le cas de prélèvements de gaz du sol, le taux d'humidité important pouvant s'avérer un frein pour la réalisation de prélèvements dynamiques, certains EP sont intéressants, en particulier ceux constitués d'une membrane hydrophobe ou d'adsorbants hydrophobes, comme les EP de AGI (« EP SPG-0008 - AGI », « EP TIPS - AGI ») composés d'adsorbants hydrophobes placés à l'intérieur d'une membrane en GoreTex® hydrophobe, ou le « EP BeSure Sampler – BEACON » composé d'un vial en verre avec des adsorbants hydrophobes.

En termes de coûts, il est à souligner qu'en présence d'une seule famille de composés, comme les COV ou les BTEX, les coûts associés aux prélèvements dynamiques sur adsorbant seront généralement plus faibles. Cependant, dans le cas d'une grande variété de composés recherchés, les coûts des échantillonneurs passifs plus élevés s'avèrent compétitifs. En soulignant cependant que la représentativité de ces deux modes de prélèvements sera différente, et que pour certains EP, seuls des résultats en masse seront fournis. Dans le cas d'une étude de screening, la mise en place rapide des EP avec des résultats par substance peut dans certains cas s'avérer avantageuse au regard d'une technique plus classique comme des mesures au PID au sein d'ouvrages temporaires de type canne gaz, cependant pour ces dernières mesures les résultats seront instantanés.

⁶² Dans le cas du « EP SPG-0008 - AGI » et du « EP TIPS - AGI » de la société AGI, du « EP BeSure Sampler - BEACON » et du « EP tube avec chromosorb 106 - BEACON » de la société BEACON, ces sociétés sont les fournisseurs mais réalisent également les analyses.

4.3 Limites générales des échantillonneurs passifs pour les gaz du sol

Le temps d'exposition des échantillonneurs passifs intégratifs est fonction notamment des concentrations des substances, des limites de quantifications attendues, des taux d'échantillonnage et de la capacité totale de l'adsorbant (pour éviter la saturation). Ces deux dernières informations ne sont que partiellement données par certains fabricants. Il est à noter parallèlement que les taux d'échantillonnage établis par les fabricants, l'ont été pour un domaine de validité, souvent sur des durées d'exposition courtes (de quelques heures à une journée) au regard de certains documents disponibles. La question de leur pertinence pour des temps d'exposition plus longs est abordée dans le cadre du projet TEMPAIR mais reste cependant posée.

Pour les résultats des mesures dans les gaz du sol exprimés en concentration, l'étape de conversion de la masse en concentration nécessite certains paramètres complémentaires à l'expression classiquement utilisée pour le milieu air. Cela est particulièrement le cas, lors de l'utilisation du SPG-0008 et du TIPS de la société AGI, avec l'introduction d'un facteur différenciant l'échantillonnage de l'air et des gaz du sol. Ce dernier permet d'ajuster le taux d'échantillonnage pour tenir compte de la résistance à la diffusion accrue, due à la présence de sol et d'eau. Cette conversion est basée sur les équations de Millington & Quirk (1961) et nécessite la connaissance de paramètres spécifiques au site, des caractéristiques du sol entourant l'EP (la porosité totale et la « water filled porosity – ou teneur volumique en eau » des sols). Les valeurs de ces paramètres seront basées :

- soit sur des mesures réalisées en laboratoire à partir d'échantillons prélevés sur site,
- soit issues de calculs ou de la littérature, et en particulier du système de classification des sols SCS⁶³ permettant de déterminer la texture en fonction de la granulométrie et de définir des valeurs par défaut pour chaque texture suite à la consultation de bases de données comme celle reprise dans US EPA (2003).

Compte tenu des résultats observés dans le cadre de cette étude, une question reste posée : quelle est la validité des résultats quantitatifs dans les gaz du sol et particulièrement dans le cas des AGI, avec l'introduction du facteur d'ajustement du taux d'échantillonnage pour la conversion des résultats, de la masse en concentration, ce facteur dépendant de caractéristiques du sol entourant l'EP et du choix des valeurs associées ? Par ailleurs, des questionnements restent également posés au regard de l'utilisation des EP de la société AGI au sein d'ouvrages permanents de type piézair, « avec un volume d'air au contact de l'échantillonneur » *a contrario* du cas des EP placés directement dans un trou de sondage de faible diamètre non équipé (obturé par un bouchon étanche), pouvant avoir un impact sur le calcul de la concentration. En effet, dans le cadre de ce travail, l'impact potentiel du volume d'air et de sol entourant directement l'EP n'a pu être mis en évidence, malgré l'acquisition de résultats d'une part avec des EP placés directement dans des trous de sub-surface (présence d'un volume d'air entourant l'EP très faible), et d'autre part dans le tubage du piézair (présence d'un volume d'air plus important).

La concentration donnée est dépendante du taux d'échantillonnage dont les conditions d'établissement et les incertitudes inhérentes à leur utilisation pour une autre durée d'échantillonnage ou un autre niveau de concentration ne sont pas clairement fournis par les fabricants. Ainsi, les incertitudes associées à une utilisation de ces échantillonneurs passifs en dehors des conditions d'élaboration de ce taux d'échantillonnage par le fabricant, conduisent à une utilisation de ces échantillonneurs préférentiellement pour une étude qualitative ou semi-quantitative (uniquement basée sur des ordres de grandeurs des concentrations).

Il est cependant nécessaire de souligner la robustesse d'un prélèvement dynamique avec adsorbant dont l'obtention du résultat en concentration ne nécessite pas de calcul spécifique à la différence des échantillonneurs passifs.

⁶³ SCS : Soil Classification System : le système de classification des sols le plus couramment utilisé en Amérique du nord.

5. Conclusions et perspectives

La littérature et les guides traitant de la mesure des masses et des concentrations dans les gaz du sol et l'air intérieur (FLUXOBAT (Traverse et al. 2013), ATTENA (ADEME, 2013), CityChlor (ADEME, 2013a, 2013b), BRGM/INERIS (2016)) mettent en exergue la forte variabilité temporelle des concentrations dans ces milieux. De ce fait, la mise en œuvre de prélèvements permettant l'acquisition de concentrations moyennes sur de longues (d'une à plusieurs semaines) durées, nécessitant la mise en œuvre d'échantillonneurs passifs, permettrait ainsi d'intégrer les variations non observées lors de mesures ponctuelles de courtes durées (prélèvements dynamiques ou par aspiration naturelle), et serait plus appropriée aux objectifs techniques et scientifiques de certaines études (par exemple l'évaluation de l'exposition des populations, le dimensionnement de travaux de dépollution, la surveillance, etc.).

Ainsi, afin de mieux intégrer les variations temporelles des concentrations et donc de mieux appréhender des mécanismes de transfert, et *in fine* les expositions des populations, des durées de prélèvement significativement plus longues, d'une à plusieurs semaines seraient plus représentatives, ce qui nécessite la mise en œuvre d'échantillonneurs passifs.

La caractérisation quantitative des gaz du sol, en France, tant dans des ouvrages temporaires de type canne gaz que d'ouvrages permanents (piézair), ou pour les ouvrages sous dalle (sub-slab), est classiquement réalisée par la mise en œuvre de prélèvements dynamiques sur des supports adsorbants, et plus occasionnellement par aspiration naturelle (Canister®), avec des prélèvements d'une durée de quelques heures, 24 heures au maximum pour ce dernier dispositif. Ainsi, la mise en œuvre des échantillonneurs passifs fait plutôt exception dans le domaine des sites et sols pollués, et est encore très limitée, alors que cela n'est pas le cas dans les études de qualité de l'air intérieur. Actuellement, seuls quelques bureaux d'études américains implantés en France proposent dans certaines de leurs études la mise en œuvre des échantillonneurs passifs pour la caractérisation qualitative des gaz du sol, dans le cadre d'études de screening de panache de pollution, suite à la mise en place des EP dans des trous de sondage de sub-surface non équipés et obturés par un bouchon étanche (mise en place des EP dans le sol suite au fonçage manuel d'un orifice d'une profondeur de l'ordre de 50 cm).

Plus particulièrement développée aux Etats-Unis, pour les gaz du sol, la technique d'échantillonnage passif est reconnue dans les référentiels de l'US EPA (1997 ; 1958 ; 1998a ; 1998b) et de l'ASTM (2016). Face à l'essor de ces supports et plus généralement de l'échantillonnage passif, une norme ASTM D7758 :11, a été publiée aux Etats-Unis en 2011, afin d'encadrer les pratiques. Les techniques passives décrites dans cette norme sont dédiées au prélèvement des gaz du sol.

Néanmoins, même si les Etats-Unis semblent posséder un retour d'expérience sur leur mise en œuvre plus particulièrement pour les gaz du sol dans des trous de sondage non équipés et obturés par un bouchon étanche (mise en place de l'EP dans le sol) ou sous la dalle de bâtiment, et sur leur application, notamment dans des études de screening de site pour la réalisation de cartographie de pollution (caractérisations qualitative (en masse) ou quantitative (en concentration)), les documents actuellement disponibles ne rendent pas compte de manière détaillée des résultats et des spécificités, ni des modalités de choix des EP et de leur mise en œuvre en termes de dimensionnement.

Ces dernières limites avaient précédemment motivé la réalisation d'un projet de recherche sur les échantillonneurs passifs, le projet PassSolAir (ADEME, INERIS, 2017), cofinancé par l'ADEME et le Ministère en charge de l'environnement. Cependant, le retour d'expérience acquis dans le projet PassSolAir par le biais de tests en chambre à atmosphère contrôlée et dans des piézairs n'avait pas permis d'une part de confirmer certaines données des fournisseurs concernant leur utilisation durant des durées d'exposition de plusieurs jours pour des gammes de concentrations significatives dans les gaz du sol, ainsi que leur utilisation pour l'obtention des résultats quantitatifs, et d'autre part de tester les EP dans des contextes diversifiés, communément rencontrés dans le domaine des sites et sols pollués (représentativité). Les constats spécifiques aux tests réalisés et aux spécificités du site pilote n'avaient pas permis d'acquiescer suffisamment de données pour émettre des recommandations satisfaisantes en termes de dimensionnement d'un plan d'échantillonnage. La validité des résultats quantitatifs dans les gaz du sol issus de piézairs restaient également à vérifier pour certains EP et certaines gammes de concentrations.

Ainsi, les investigations réalisées dans le cadre du projet TEMPAIR visaient à compléter les travaux existants. Ce projet repose sur l'évaluation des performances de 5 échantillonneurs passifs (EP) pour la caractérisation des gaz du sol, reposant sur la réalisation de plusieurs campagnes de mesure au sein de 7 ouvrages pérennes (piézairs) captant différents horizons lithologiques et de 5 trous de sondage de sub-surface non équipés et obturés par un bouchon étanche (mise en place des EP dans le sol suite au fonçage manuel d'un orifice d'une profondeur de l'ordre de 50 cm) couvrant 3 différentes zones du site atelier, emplacements de prélèvements présentant des gammes de concentrations en PCE différentes, de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au g/m^3 . Et outre le choix de zones avec des gammes de concentrations différentes, la réalisation de campagnes alliant des prélèvements de gaz du sol dans des piézairs et des trous de sondage de sub-surface non équipés et obturés

par un bouchon étanche, devaient permettre l'évaluation des EP dans deux configurations au regard du volume d'air autour des EP, plus important dans un piézair que dans un trou de sondage non équipé (obturé par un bouchon étanche), et ainsi l'impact potentiel de la formulation de conversion des résultats de la masse en concentration, particulièrement pour les EP de AGI.

Les EP mis en œuvre sont :

- le BeSure® Sampler commercialisé par l'entreprise BEACON Environmental Services Inc. EP,
- le SPG-0008 commercialisé par l'entreprise américaine Amplified Geochemical Imaging, LLC (AGI),
- le TIPS, en cours de développement par l'entreprise américaine Amplified Geochemical Imaging, LLC (AGI),
- le tube en acier inox avec adsorbant chromosorb 106 (avec une tête de diffusion depuis fin août 2015), commercialisé par l'entreprise américaine BEACON Environmental Services Inc.,
- le tube en acier inox avec un adsorbant Radiello 145 et avec une tête de diffusion, conditionné par l'INERIS, un développement interne.

Les moyens déployés reposent sur la réalisation de prélèvements à l'aide de plusieurs échantillonneurs passifs et par pompage sur charbon actif avant et après la période des prélèvements passifs des gaz du sol (référence au regard de la faible variabilité temporelle des concentrations observées sur le site comme précédemment mentionné). En outre, afin de permettre de confirmer ou d'infirmer les tendances observées dans l'évaluation de l'utilisation de ces EP dans les gaz du sol, des prélèvements avec des EP dans l'air à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment ont également été réalisés durant les mêmes campagnes.

Parmi les EP mis en œuvre dans le cadre de ce projet, seuls les résultats de l'« *EP BeSure Sampler - BEACON* » sont exprimés uniquement en masse adsorbée, la société BEACON ne proposant pas la possibilité de les transposer en concentrations.

Les résultats des EP pour la caractérisation des gaz du sol mettent en évidence pour certains d'entre eux et pour certaines gammes de concentrations de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au g/m^3 et durées d'exposition (1 à 7 jours) des résultats comparables à ceux des prélèvements dynamiques avec charbon actif (référence). Il a également été observé pour certains EP, ceux de AGI, lors de plusieurs tests (durées d'exposition de 5 et 7 jours) réalisés dans la gamme de concentrations couramment rencontrées dans les études de sites pollués (de la dizaine ou de la centaine de mg/m^3) des résultats qualifiés par AGI comme des valeurs estimées, la masse étant supérieure à la gamme de calibration analytique.

Dans le cadre d'études de screening des gaz du sol (résultats qualitatifs exprimés en masse adsorbée sur le support adsorbant de l'EP), menées pour une reconnaissance qualitative de la contamination d'un site, dans le but d'identifier la ou les zones « source » ou de délimiter le panache gazeux de pollution, les travaux menés ont montré des résultats (en masse) cohérents entre les différents EP utilisés en termes de zonation.

Des recommandations sont formuler concernant le choix des EP pour les gaz du sol. Ainsi, il doit être tenu compte :

- des objectifs de l'étude (screening, diagnostic, surveillance, évaluation des expositions, etc.), vis-à-vis de l'intégration temporelle souhaitée et du type de résultats nécessaires, en masse ou en concentration (les résultats en concentration n'étant pas fournis pour tous les EP),
- des caractéristiques de l'EP tenant compte des spécificités du site (substances, concentrations attendues, durées d'exposition souhaitées, etc.) et de leur géométrie (taux d'échantillonnage, capacité d'adsorption, gammes de validité, etc.), pour lesquelles des échanges avec les fournisseurs⁶⁴ sont primordiaux.

⁶⁴ Dans le cas du « EP SPG-0008 - AGI » et du « EP TIPS - AGI » de la société AGI, du « EP BeSure Sampler - BEACON » et du « EP tube avec chromosorb 106 - BEACON » de la société BEACON, ces sociétés sont les fournisseurs mais réalisent également les analyses.

Les avantages des échantillonneurs passifs confirmés pour les premiers dans le cadre du projet, concernent notamment les aspects suivants :

En termes de mise en œuvre, tant pour les prélèvements d'air à l'intérieur ou l'extérieur d'un bâtiment, que pour les gaz du sol dans un trou de sondage de sub-surface non équipé (obturé par un bouchon étanche) ou dans un piézair, les échantillonneurs passifs testés sont très simples d'utilisation, et rapides à mettre en œuvre, particulièrement dans le cas d'étude de screening des gaz du sol avec la mise en place des EP dans le sol après le fonçage d'un orifice d'une profondeur de l'ordre de 50 cm.

Aucun équipement supplémentaire ni aucune source d'énergie extérieure n'est nécessaire sur le terrain. Pour rappel, les prélèvements dynamiques nécessitent quant à eux un contrôle du débit des pompes et en cas de prélèvement de longue durée, généralement de plus de 8 heures, une source d'énergie.

En termes de conditionnement, selon les fournisseurs, le « EP SPG-0008 - AGI », le « EP TIPS - AGI », le « EP BeSure Sampler – BEACON » n'ont pas besoin d'être conservés ou transportés dans des conditions particulières (ni au froid, ni à l'abri de la lumière) mais simplement dans leur flacon en verre fermé hermétiquement. Pour ceux de BEACON et AGI, les tests réalisés par les fournisseurs indiquent l'absence d'impact lié au transport dans ces conditions.

En termes de caractéristiques spécifiques des EP, outre la mise en œuvre sur des durées plus longues que les prélèvements dynamiques ou par aspiration naturelle, les avantages suivants sont à souligner :

- en présence de sols peu perméables, pour lesquels la réalisation d'un prélèvement dynamique est problématique les échantillonneurs passifs s'avèrent intéressants,
- dans le cas de prélèvements de gaz du sol, le taux d'humidité important pouvant s'avérer un frein pour la réalisation de prélèvements dynamiques, certains EP sont intéressants, en particulier ceux constitués d'une membrane hydrophobe ou d'adsorbants hydrophobes, comme les EP de AGI composés d'adsorbants hydrophobes placés à l'intérieur d'une membrane en GoreTex® hydrophobe, ou le « EP BeSure Sampler – BEACON » composé d'un vial en verre avec des adsorbants hydrophobes.

Cependant, des limites des échantillonneurs passifs pour les gaz du sol sont à mentionner actuellement, concernant principalement :

- Le temps d'exposition des échantillonneurs passifs intégratifs est fonction notamment des concentrations des substances, des limites de quantifications attendues, des taux d'échantillonnage et de la capacité totale de l'adsorbant (pour éviter la saturation). Or, ces deux dernières informations ne sont que partiellement données par certains fabricants. Il est à noter parallèlement que les taux d'échantillonnage établis par les fabricants, l'ont été pour un domaine de validité, souvent sur des durées d'exposition courtes (de quelques heures à une journée) au regard de certains documents disponibles. La question de leur pertinence pour des temps d'exposition plus longs est abordée dans le cadre de TEMPAIR mais reste cependant posée.
- Pour les résultats des mesures dans les gaz du sol exprimés en concentration, l'étape de conversion de la masse en concentration nécessite certains paramètres complémentaires à l'expression classiquement utilisée pour le milieu air. Cela est particulièrement le cas, lors de l'utilisation du SPG-0008 et du TIPS de société AGI, avec l'introduction d'un facteur différenciant l'échantillonnage de l'air et des gaz du sol. Ce dernier permet d'ajuster le taux d'échantillonnage pour tenir compte de la résistance à la diffusion accrue, due à la présence de sol et d'eau. Cette conversion est basée sur les équations de Millington & Quirk (1961) et nécessite la connaissance de paramètres spécifiques au site, des caractéristiques des sols entourant l'EP. Les valeurs de ces paramètres seront soit basées sur des mesures réalisées en laboratoire à partir d'échantillons prélevés sur site, soit issues de calculs ou de la littérature, et en particulier du système de classification des sols SCS⁶⁵ permettant de déterminer la texture en fonction de la granulométrie et de définir des valeurs par défaut pour chaque texture suite à la consultation de bases de données comme celle reprise dans US EPA (2003). Compte tenu des résultats observés dans le cadre de cette étude, une question reste posée : quelle est la validité des réponses quantitatives dans les gaz du sol et particulièrement dans le cas des AGI, avec l'introduction du facteur d'ajustement du taux d'échantillonnage pour la conversion des résultats, de la masse en concentration, ce facteur dépendant de caractéristiques du sol entourant l'EP et du choix de leur valeur ? Par ailleurs, des questionnements restent également posés au regard de l'utilisation des EP de la société AGI au sein d'ouvrages permanents de type piézair, « avec un volume d'air au

⁶⁵ SCS : Soil Classification System : le système de classification des sols le plus couramment utilisé en Amérique du nord.

contact de l'échantillonneur » *a contrario* du cas des EP placés directement dans un trou de sondage de faible diamètre non équipé (obturé par un bouchon étanche), pouvant avoir un impact sur le calcul de la concentration.

- La concentration donnée est dépendante du taux d'échantillonnage dont les conditions d'établissement et les incertitudes inhérentes à leur utilisation pour une autre durée d'échantillonnage ou un autre niveau de concentration ne sont pas clairement fournis par les fabricants. Ainsi, les incertitudes associées à une utilisation de ces échantillonneurs passifs en dehors des conditions d'élaboration de ce taux d'échantillonnage par le fabricant, conduisent à une utilisation de ces échantillonneurs préférentiellement pour une étude qualitative ou semi-quantitative (uniquement basée sur des ordres de grandeurs des concentrations).

En termes de perspectives, il apparaît nécessaire de poursuivre des travaux, plus particulièrement sur la quantification des concentrations dans les gaz du sol avec des EP mis en œuvre dans des trous de sondage de sub-surface non équipés (obturés par un bouchon étanche) ou dans les piézais. Ces travaux devront notamment être axés sur la conversion en concentration des résultats en masse, la validité de l'intégration à cette conversion, pour certains EP, des paramètres du sol (porosité, etc.) ainsi que des caractéristiques de l'ouvrage (influence du volume d'air entourant l'EP). Des essais complémentaires pourraient être mis en œuvre, afin de consolider le retour d'expérience, principalement en termes de durées d'exposition et de gammes de masses et de concentrations attendues pour les gaz du sol, ainsi que l'acquisition de cette information avec d'autres substances (BTEX, TPH, autres COV). Cela permettrait de proposer des recommandations pour l'utilisation des EP dans différents contextes d'études et les cas pour lesquels les EP peuvent être complémentaires aux techniques de prélèvements dynamiques ou par aspiration naturelle (Canister®).

6. Références consultées

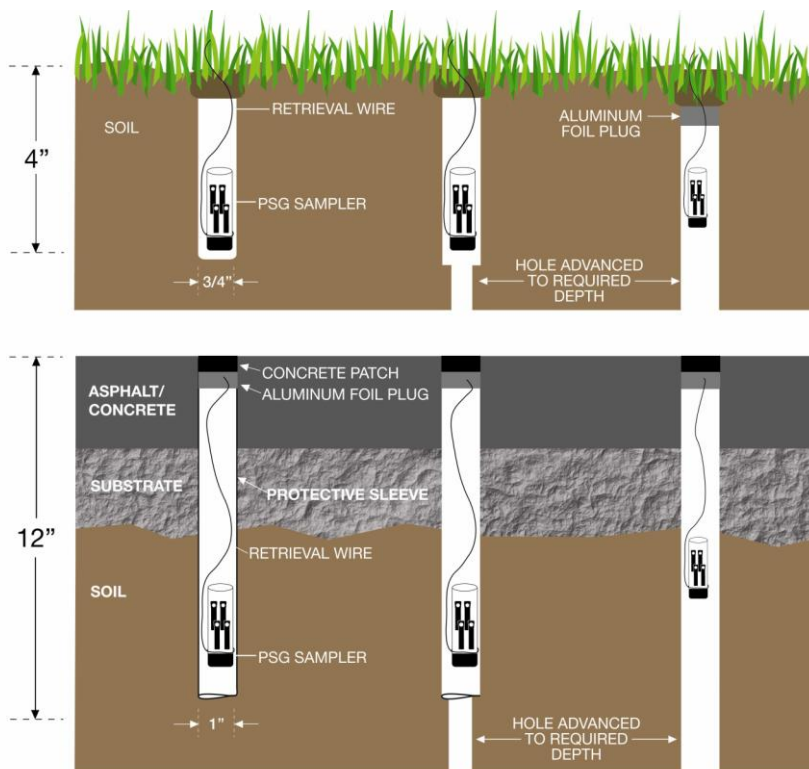
- ADEME, 2011a. METROCAP – Synthèse de l'enquête réalisée auprès des bureaux d'études quant à leur utilisation de capteurs passifs pour la mesure de la qualité des eaux souterraines, dans le contexte de sites pollués, Rapport d'étude DRC -11-105722-02621A, Mai 2011.
- ADEME, 2011b. METROCAP - Synthèse bibliographique relative aux capteurs passifs utilisés pour la mesure de la qualité des eaux souterraines, Rapport d'Etude DRC-11-105722-05324A, Mai 2011.
- ADEME, 2011c. METROCAP – Synthèse de tests exploratoires sur sites de mesures de COHV dans les eaux souterraines par capteurs passives, Rapport d'Etude DRC-11-105722-05328A, Mai 2011.
- ADEME, 2011d. METROCAP, Recommandations pour l'utilisation de capteurs passifs pour la mesure de la qualité des eaux souterraines, dans le contexte de sites et sols pollués, Rapport d'étude DRC-11-105722-04595A, Mai 2011.
- ADEME, 2013. ATTENA, Mode Opérateur – Apports et limitations de l'analyse des gaz du sol 2013
- ADEME, 2013a. CITYCHLOR - Technical Report - Soil-gas monitoring : soil-gas well designs and soil-gas sampling techniques. Rapport INERIS-DRC-13-114341-03542A ; Accessible sur <http://www.citychlor.eu/>
- ADEME, 2013b. CITYCHLOR - Technical Report : Characterization of indoor ambient air quality in relation to potential soil pollution by volatile and semi-volatile chemicals. Rapport INERIS-DRC-10-109454-02386B ; Accessible sur <http://www.citychlor.eu/>
- ADEME, 2013c. CITYCHLOR - Technical Report : Models for predicting transfers to indoor air. Rapport INERIS-DRC-13-114341-04103A ; Accessible sur <http://www.citychlor.eu/>
- ADEME, 2014. PassCityChlor, Mesure de la qualité des eaux souterraines à l'aide d'échantillonneurs passifs dans le contexte de sites pollués.
- ADEME, INERIS, 2017. Projet PassSolAir. Les échantillonneurs passifs pour la caractérisation des gaz du sol et de l'air intérieur dans le contexte des sites et sols pollués. INERIS DRC-17-130224-03499C. A paraître en 2017.
- AFNOR, 2006. Norme NF ISO10381-7. Qualité du sol - Échantillonnage - Partie 7 : lignes directrices pour l'échantillonnage des gaz du sol ; travail de révision en cours.
- AFNOR, 2011. Norme NF X 31-620 :2011. Qualité du sol – prestations de services relatives aux sites et sols pollués (études, ingénierie, réhabilitation de sites pollués et travaux de dépollution). Révision de juin 2011, version révisée à paraître en 2017.
- Amplified Geochemical Imaging (AGI), 2014. Summary of sampling rate calibration for Gore SPG-0008 modules in a gas phase. Document de AGI® Survey SPG-SOP-0495 R3 transmis avec les bordereaux d'analyse.
- Amplified Geochemical Imaging (AGI), 2015. « Standard practice for determining the sampling rate of passive diffusion samplers in various environmental media », SPG-SOP-0493. Document transmis avec les bordereaux d'analyse.
- Amplified Geochemical Imaging (AGI). Cases History : voir le site Internet de AGI : <https://www.agisurveys.net/environmental-case-studies.html>
- ASTM, 2016. ASTM D7758 – 11, 2016. Standard Practice for Passive Soil Gas Sampling in the Vadose Zone for Source Identification, Spatial Variability Assessment, Monitoring, and Vapor Intrusion Evaluations.
- BEACON. Case Study : Chlorinated Plume Investigation, Beacon Environmental Services, Inc.
- BEACON. Case Study : Dry cleaner investigation, Beacon Environmental Services, Inc.
- BEACON. Case Study : Manufactured gas plant investigation, Beacon Environmental Services, Inc.
- BEACON. Case Study : Non-intrusive site investigation, Beacon Environmental Services, Inc.
- BEACON. Case Study : Vapor intrusion pathway investigation, Beacon Environmental Services, Inc.
- BEACON. Case Study : Chlorinated solvents, Beacon Environmental Services, Inc.
- BRGM – INERIS, 2016. 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 BRGM RP-65870-FR – rapport INERIS DRC-16-156183-01401A - version 3.0- 25/11/2016.

- Faten S., 2013. Novel Applications of the Waterloo Membrane Sampler (WMS) in Volatile Organic Compound Sampling from Different Environmental Matrices. Thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Master of Science in Chemistry.
- Lamb B., et al., 2009. Comparison of Results of Gore Sorber® Passive Soil Gas screening surveys and analytical data for unsaturated zone material in areas of elevated chlorinated volatile organic compounds, Lamb B., et al.
- Gonzalez-Flesca, N. and A. Frezier. 2005. A new laboratory test chamber for the determination of diffusive sampler uptake rates. *Atmospheric Environment*, 2005. 39: p. 4049-4056.
- Hodny, J.W., J.E. Whetzel Jr., and H.S. Anderson II, 2009. Quantitative passive soil gas and air sampling in vapor intrusion investigations. in: *Proceedings of Vapor Intrusion 2009*, Air & Waste Management Association, San Diego. January. Available at : https://www.agisurveys.net/uploads/Quantitative_Passive_Sampling_for_VI.pdf.
- INERIS, 2004a. Exposition par inhalation au benzène toluène ; éthylbenzène, xylènes (BTEX) dans l'air : Sources, mesures et concentrations, INERIS-DRC-04-59770-AIRE-n°1056_Izd.
- INERIS, 2004b. Trichloroéthylène, Tétrachloréthylène et Chlorure de Vinyle dans l'air : Sources, mesures et concentrations, INERIS-DRC-04-59770-AIRE-n°0094_Izd.
- INERIS, 2012. Investigations complémentaires suite à des premières mesures de perchloroéthylène dans un logement voisin d'une installation de nettoyage à sec utilisant ce type de solvant en Rhône-Alpes, INERIS DRC-12-132629-13864A.
- INRS, 2000. Nouveaux supports pour le prélèvement de polluants atmosphériques. Etude comparative. ND 2126-179-00.
- NF ISO10381-7, 2006. Qualité du sol - Échantillonnage - Partie 7 : lignes directrices pour l'échantillonnage des gaz du sol ; version révisée à paraître.
- Jay W. Hodny, Ph.D., James E. Whetzel. Jr., and Harry S. Anderson, 2009. Quantitative Passive Soil Gas and Air Sampling in Vapor, Intrusion Investigations, II. *Proceedings of Vapor Intrusion 2009*, Air & Waste Association.
- Johnson Paul C. and Ettinger Robert A., 1991. Heuristic model for predicting the intrusion rate of contaminant vapors into buildings. *Environmental Science and Technology*, vol. 25 (8), pp. 1445-1452.
- LCSQA, 2008. Élaboration de protocoles de surveillance du formaldéhyde, du benzène et du monoxyde de carbone dans l'air des lieux clos ouverts au public, LCSQA CSTB-EMD-INERIS-DRC-08-94298-15176A, 2008
- LCSQA, 2004. Programme d'évaluation du tube Radiello pour la mesure des BTEX, LCSQA, EMD.
- McAlary T., 2014. Development of More Cost-Effective Methods for Long-Term Monitoring of Soil Vapor Intrusion to Indoor Air Using Quantitative Passive Diffusive-Adsorptive Sampling. ESTCP Project ER-200830. Final Report.
- McAlary T. et al., 2014. Quantitative Passive Diffusion-Adsorptive Sampling Techniques for Vapor Intrusion Assessment.
- Millington R, J., 1959. Gas Diffusion in Porous Media, *Science*, Vol. 130, 100-102.
- Millington & Quirk, 1961. Permeability of Porous Solids, *Trans. Faraday Soc*, 57, (1961), 1200-1207.
- NAVFAC, 2016. Passive sampling for vapor intrusion assessment. Technical Memorandum TM-NAVFAC EXWC-EV-1503. Final, July 2015.
- Odenchantz, J. E., and H. O'Neill, 2009. Passive to active tie-in for soil gas surveys: Improved technique for source-area, spatial variability, remediation-monitoring, and vapor-intrusion assessment. *Remediation* 19:71-83.
- Ohio Environmental Protection Agency, 2010. Sample collection and evaluation of vapor intrusion to indoor air for remedial response and voluntary action programs. Guidance Document.
- Office of Superfund Remediation and Technology Innovation and Office of Research and Development, 2012. Guidance for the application of Passive Samplers at Superfund Sites.
- OSHA, 1999. Methods development Team. Industrial hygiene Chemistry division. C J Elskamp. Radiello. <http://www.radiello.com>

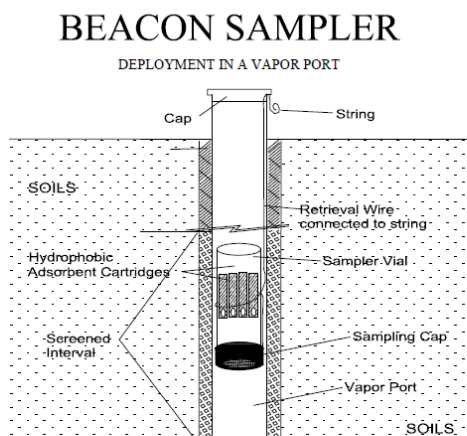
- Tolnai, B., A. Gelencsér, C. Gál, and J. Hlavay, 2000. Evaluation of the reliability of diffusive sampling in environmental monitoring. *Analytica Chimica Acta* 408:117–122. Available at <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003267099008788>.
- Traverse S., Schäfer G., Chastanet J., Hulot C., Perronnet K., Collignan B., Cotel S., Marcoux M., Côme J.M., Correa J., 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
- Traverse S., Chastanet J., Hulot H., Gleize T., Richez F., Dorffer L., 2017. Projet TEMPAIR – partie 1. Variabilité temporelle des concentrations en PCE dans les gaz du sol et l'air intérieur. Mars 2017.
- Traverse S., Hulot H., Gleize T., Richez F., Dorffer L., 2017. Projet TEMPAIR – partie 3. Prélèvement des gaz du sol : impact de filtres anti-humidité sur l'adsorption de PCE & TCE sur charbon actif et impact de la purge préalable au prélèvement. Mars 2017.
- US EPA, 1998. Innovative Technology Verification Report, Soil Gas Sampling Technology W.L. Gore & Associates, Inc. GORE-SORBER® Screening Survey.
- US EPA, 1997. Chapter IV : Soil-gas surveys.
- US EPA, 1998a. Innovative Technology Verification Report, Groundwater Sampling Technologies W.L. Gore & Associates, Inc. GORE-SORBER® Screening Survey.
- US EPA, 2003. User's Guide for Evaluating Subsurface Vapor Intrusion into Buildings. Retrieved from <http://www.epa.gov/oswer/riskassessment/airmodel/pdf/guide.pdf>
- US EPA, 2016. Passive Samplers for Investigations of Air Quality : Method Description, Implementation, and Comparison to Alternative Sampling Methodes. ORD Engineering Issue Paper.

**ANNEXE 1. ILLUSTRATIONS DE LA MISE EN PLACE DU « EP BESURE
SAMPLER - BEACON » ET DU « EP SPG-0008 - AGI » POUR LES GAZ
DU SOL, EXTRAITES DE REFERENCES DES FABRIQUANTS**

Illustration de la mise en place du « EP BeSure Sampler - BEACON » pour les gaz du sol dans un ouvrage non tubé et un ouvrage tubé



Extrait du document Passive soil gas testing – Standard for site characterization de BEACON Environmental Services, Inc. (http://www.beacon-usa.com/uploads/file/Passive_Soil_Gas_Testing_Standard_for_Site_Characterization.pdf)



Extrait du Field Kit Guide transmis par BEACON Environmental Services, Inc.

Illustration de la mise en place du « EP SPG-0008 - AGI » pour les gaz du sol dans un ouvrage non tubé (enfouissement direct dans le sol) et d'air sous-dalle de bâtiment (sub-slab)

Soil Gas and Sub-slab Soil Gas Sampling



Slide hammer



Rotary hammer drill



Initial insertion



After insertion, impermeable cork sealed



Initial insertion into permanent sampling port.



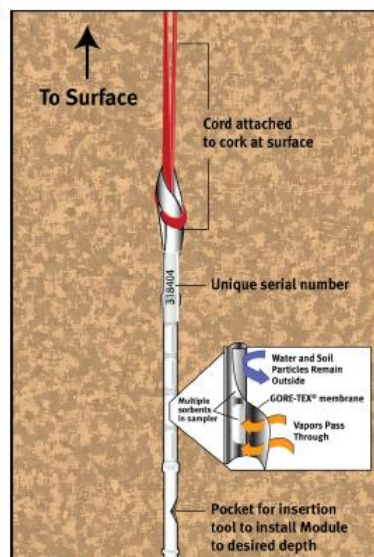
Angle beneath slab.



Rotary hammer drill



Note: Dry cleaner operations continue, no obstructions on surface after installation.



GORE-TEX® membrane allows for unimpeded migration of soil gas to adsorbent, while protecting the adsorbent from liquid water and soil.



www.gore.com/surveys

W. L. Gore & Associates, Inc.
100 Chesapeake Blvd.
P.O. Box 10
Elkton, MD 21922-0010
Tel. 1-410-392-7600
Fax. 1-410-506-4870

Sale Offices:
Europe: +49-89-4612-2198
San Francisco: 1-415-648-0438

Email: environmental@wlgore.com

The optimal performance of any Gore product is dependent upon how it is incorporated in the final device.
Please contact one of our technical sales associates for application assistance.
GORE and designs are trademarks of W. L. Gore & Associates © 2009 W. L. Gore & Associates, Inc.

4 of 4
LIT 117.11 092509

Extrait du document « Soil Gas & Sub-slab Soil Gas Sampling – Storage, Installation and Retrieval Guidelines » de Gore & Inc. devenue Amplified Geochemical Imaging, LLC (AGI)

ANNEXE 2. AUTRE ECHANTILLONNEUR PASSIF

L'échantillonneur passif Waterloo Membrane Sampler™ (WMS™) commercialisé par SIREM

L'échantillonneur passif cinétique Waterloo « Waterloo Membrane Sampler™ (WMS™) (passive permeation sampler), initialement développé par Suresh Seethapathy et Tadeusz Góreckià de l'Université de Waterloo (Faten Salim 2013), est commercialisé depuis 2013 par SiREM pour la caractérisation des gaz du sol. Les analyses sont assurées par Air Toxics Ltd. (Folsom, CA) par GC / MS.

En termes de description technique, il se compose d'un flacon en verre dans lequel est introduit un adsorbant. Une mince membrane hydrophobe en polydiméthylsiloxane (PDMS) recouvre l'embouchure du flacon, et un capuchon en aluminium serti maintient la membrane.

Il peut être installé dans des ouvrages temporaires ou semi-permanents, la membrane étant protégée du contact du sol avec un dispositif (filet par exemple). Sa géométrie conduit à un faible taux d'adsorption et améliore sa précision.

Les composés échantillonnés seront fonction du choix des adsorbants, qui peuvent être de l'Anasorb 747 (disponible auprès de SKC Inc., quantité de 100 g) ou du Carbopack B (disponible auprès de Sigma, quantité de 10 g) en fonction de l'application et des gammes d'humidité et de concentrations rencontrées dans les gaz du sol.

Les applications visées sont spécifiquement celles de la caractérisation des gaz du sol.

Les données fournies sont des données qualitatives (masses) et quantitatives (concentrations) et pour les gaz du sol tenant compte de l'équation présentée en section 2.5 (Équation 2).

D'après le fournisseur, le taux d'absorption a été mesuré expérimentalement pour de nombreux COV communs et peut facilement être calculé pour d'autres composés, car il est directement proportionnel à l'indice de rétention, une propriété qui est facilement disponible dans la littérature scientifique.

Avertissement :

Du fait que cet échantillonneur passif n'est commercialisé que depuis 2013, il n'a pu être utilisé ni dans le cadre du projet PassSolAir ni dans le cadre du projet TEMPAIR.



FIGURE - ILLUSTRATION DE L'ÉCHANTILLONNEUR PASSIF WMS™

**ANNEXE 3. SYNTHÈSE DES RESULTATS ASSOCIES AUX TESTS EN
CHAMBRE A ATMOSPHERE CONTROLEE DANS LE CADRE DU
PROJET PASSOLAIR**

Les résultats du projet PassSolAir (ADEME, INERIS, 2017) rapportés dans cette annexe concernent plus particulièrement les conclusions associées aux tests en chambre à atmosphère contrôlée permettant de simuler de manière répétable et maîtrisée, des atmosphères contaminées en composés volatils ; cette chambre ayant pour vocation d'évaluer les performances de moyens métrologiques dans des conditions environnementales variables.

Les échantillonneurs passifs mis en œuvre étaient le BeSure® Sampler de BEACON Environmental Services Inc. « *EP BeSure Sampler - BEACON* »⁶⁶, le SPG-0008 « *EP SPG-0008 - AGI* » et le TIPS « *EP TIPS - AGI* » de Amplified Geochemical Imaging LLC (AGI), le tube avec adsorbant Chromosorb 106 de BEACON Environmental Services Inc. « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* », le tube avec adsorbant Radiello® 145 conditionné par l'INERIS « *EP tube avec Radiello 145* », le corps diffusif avec adsorbant Radiello® 145 « *EP corps diffusif avec Radiello 145* », le plan d'échantillonnage comportant plusieurs tests de répétabilité.

Les conditions de mise en œuvre, dont des taux élevés d'humidité de 70 à 86%, correspondaient plus particulièrement à celles observées lors de campagnes de mesures des gaz du sol. Quant aux gammes de concentration générées, elles étaient de 52 µg/m³ durant 2 ou 7 jours, 114 µg/m³, 5 000 µg/m³, 14 000 µg/m³, 40 166 µg/m³ et 612 460 µg/m³ durant 2 jours.

Le tableau suivant donne une synthèse générale du retour d'expérience acquis à l'issue des campagnes de mesures en chambre contrôlée en termes de gammes de concentrations en PCE caractérisées, d'évaluations des performances des échantillonneurs passifs et de comparaison des résultats avec ceux des prélèvements dynamiques sur charbon actif.

Dans le cas des échantillonneurs passifs de la société AGI, la conversion des masses en concentration a été réalisée en considérant le milieu « air » et l'Équation 2 mentionnée précédemment en section 2.5.

En termes de comportement des échantillonneurs passifs, tenant compte des incertitudes analytiques, il apparaît en fonction des gammes de concentrations de :

- **50 µg/m³ (2 et 7 jours d'exposition) et de 100 µg/m³ (2 jours d'exposition)** : les concentrations des « *EP SPG-0008 - AGI* », « *EP TIPS - AGI* », « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* », « *EP tube avec Radiello 145* », « *EP corps diffusif avec Radiello 145* » sont généralement similaires ou du même ordre de grandeur (facteur inférieur à 10) que celles des prélèvements dynamiques sur charbon actif ;
- **5 000 µg/m³ (2 jours d'exposition)** : les concentrations des « *EP TIPS - AGI* », « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* », « *EP tube avec Radiello 145* », « *EP corps diffusif avec Radiello 145* » sont similaires ou du même ordre de grandeur (facteur inférieur à 10) que celles des prélèvements dynamiques sur charbon actif. Quant au cas du « *EP SPG-0008 - AGI* », les résultats sont des valeurs qualifiées par la société AGI comme des valeurs estimées (masse supérieure à la gamme de calibration analytique) ;
- **14 000 µg/m³ (2 jours d'exposition)** : les concentrations des « *EP TIPS - AGI* », « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* », « *EP corps diffusif avec Radiello 145* » sont similaires à celles des prélèvements dynamiques sur charbon actif. La concentration du « *EP tube avec Radiello 145* » est similaires à celles des prélèvements dynamiques sur charbon actif. Pour le « *EP SPG-0008 - AGI* », les résultats sont des valeurs qualifiées par la société AGI comme des valeurs estimées (masse supérieure à la gamme de calibration analytique) ;
- **40 000 µg/m³ (2 jours d'exposition)** : le « *EP TIPS - AGI* » et le « *EP tube avec Radiello 145* » montrent des concentrations similaires à celles des prélèvements dynamiques sur charbon actif. Celles des « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » sont du même ordre de grandeur que celles des prélèvements dynamiques sur charbon actif. Dans ce cas également, pour le « *EP SPG-0008 - AGI* », les résultats sont des valeurs qualifiées par la société AGI comme des valeurs estimées (masse supérieure à la gamme de calibration analytique) ;

⁶⁶ Pour rappel cet EP ne donne que des résultats en masse, et ses résultats en masse ne seront pas décrits dans cette section traitant des concentrations dans l'air.

- **600 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2 jours d'exposition)** : les concentrations des « *EP tube avec Radiello 145* » présentent des concentrations similaires à celles des prélèvements dynamiques sur charbon actif, et celles des « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » présentent des variations de concentration de plus d'un ordre de grandeur. Quant aux « *EP SPG-0008 - AGI* » et « *EP TIPS - AGI* », leurs résultats sont des valeurs qualifiées par la société AGI comme des valeurs estimées (masse supérieure à la gamme de calibration analytique).

Ainsi, pour les durées d'exposition testées, de 2 jours et pour des gammes de concentration à partir de 5 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et plus, il apparaît que les masses des « *EP SPG-0008 - AGI* » sont supérieures à la gamme de calibration analytique conduisant à des résultats mentionnés comme estimés par la société AGI et donc indicatifs. Il est à souligner que la gamme entre 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 5 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ n'a pas été testée. En ce qui concerne le « *EP TIPS - AGI* », pour des gammes de concentration de 600 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, les résultats sont également des valeurs qualifiées par la société AGI comme des valeurs estimées (masse supérieure à la gamme de calibration analytique). La gamme entre 40 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 600 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ n'a pas été testée.

**TABLEAU - SYNTHÈSE DES MESURES EN TERMES DE GAMMES DE CONCENTRATIONS ISSUES DES TESTS EN CHAMBRE A ATMOSPHERE CONTROLÉE EN PCE –
PROJET PASSOLAIR**

Concentration de « référence », PA avec CA [mg/m ³] (I.A.= 27%)	Durée d'exposition des EP [jour]	Concentration des EP [mg/m ³]					Autres conditions				
		EP SPG-0008 <i>Amplified Geochemical Imaging - AGI (USA)</i> (I.A.= 16%)	EP TIPS (en développement) <i>Amplified Geochemical Imaging - AGI (USA)</i> (I.A.= 16%)	EP tube avec adsorbant chromosorb 106 <i>BEACON Environmental Service (USA)</i> (I.A.= 5%)		EP tube avec adsorbant Radiello 145 <i>(INERIS, développement interne)</i> (I.A.= 30%)	EP corps diffusif avec adsorbant Radiello 145 (I.A.= 30%)	T. moy. (°C)	H. moy. (%)		
0,05	7	0,03 – 0,03	0,07 – 0,07	0,06 – 0,08		0,03 – 0,05	0,06 – 0,07	10	60		
0,05	2	0,05 – 0,05	< 0,03 – 0,07	0,06 – 0,07		0,04 – 0,05	0,05 – 0,06	10	60		
0,11		0,06 – 0,06	0,12 – 0,13	0,14	0,24	0,12 – 0,13	-	20	86		
5		0,91 – 0,94 (*)	2,5	5,6	6,5	7,7	5,6	20	4,1 – 6,1	10	70
14		1,7 (*) – 1,7 (*) (N)	15 – 16	15	17	22	97	11 – 17	10	70	
40		3,4 (*) – 3,5 (*)	40 – 44	88 – 147	62 – 66	-	12	81			
612		5,2 (*) – 5,5 (*)	373 (*) – 380 (*)	1 350 – 1 867	609 – 893	-	10	70			
<p>Légende EP : échantillonneur passif ; PA : prélèvement actif ; CA : charbon actif ; I.A. : incertitude analytique ; - : EP non utilisé ; < X : valeur inférieure à la limite de quantification égale à X ; T. moy. : température moyenne ; H. moy. : humidité moyenne ; (*) : valeurs qualifiées par le laboratoire comme des valeurs estimées (masse supérieure à la gamme de calibration analytique). Concentration de l'EP au regard de la « concentration de référence » tenant compte des incertitudes analytiques :</p>											
similaire		variation < facteur 5 [(N) : cas avec un facteur compris entre 5 et 10]			variation > facteur 10						

ANNEXE 4. EVALUATION DES ECHANTILLONNEURS PASSIFS DANS L'AIR INTERIEUR ET EXTERIEUR DANS LE CADRE DU PROJET TEMPAIR

Objectifs

Ces expérimentations ont été réalisées dans l'air intérieur et extérieur, un milieu dans lequel le comportement des gaz est mieux maîtrisé que dans les gaz du sol, afin de permettre de confirmer ou infirmer les tendances observées dans les gaz du sol. Dans le cadre du projet PassSolAir (ADEME, INERIS, 2017), le site pilote étant encore en activité, les expérimentations dans l'air intérieur n'avaient pas été réalisées dans des conditions optimales en termes d'études d'intercomparaison des différents échantillonneurs passifs et prélèvements dynamiques.

En outre, ce plan d'expérience dans l'air permet de s'affranchir de l'impact potentiel « des incertitudes » de la formulation de conversion des résultats d'une masse en concentration, ne faisant pas intervenir le « facteur d'influence du sol », intégrant la porosité totale et la « water filled porosity – ou teneur volumique en eau », comme dans le cas de la caractérisation des gaz du sol telle que présentée par AGI (cf. section antérieure 2.5) lors de l'utilisation des « EP SPG-0008 - AGI » et « EP TIPS - AGI ».

Plan général d'échantillonnage et mise en œuvre des prélèvements dans l'air intérieur et extérieur

Trois campagnes de prélèvements ont été réalisées en 2014 et 2015 sur le site atelier qui a été décrit précédemment en section 1.4.1 sur des périodes de un à huit jours dans l'air intérieur et extérieur. Les campagnes se sont déroulées en périodes estivales et hivernales, afin de couvrir des conditions de transfert différentes et donc *a priori* des gammes de concentrations différentes.

Les EP mis en œuvre avec le protocole décrit sont, les « EP BeSure Sampler - BEACON »⁶⁷, « EP SPG-0008 - AGI », « EP TIPS - AGI », « EP tube avec Chromosorb 106 - BEACON », « EP tube avec Radiello 145 », et « EP corps diffusif avec Radiello 145 », et pour les prélèvements dynamiques en tant que concentration de référence, des tubes de charbon actif. En effet, les moyens déployés reposent également sur la réalisation de prélèvements concomitants dans l'air intérieur et extérieur à l'aide des échantillonneurs passifs et des prélèvements par pompage sur charbon actif (charbon actif d'une masse de 50 mg de la marque SKC comportant deux zones, une zone de mesure et une zone de contrôle). Ces prélèvements dynamiques avec charbon ont été pris comme référence au regard de la faible variabilité temporelle des concentrations observées sur le site.

Le tableau suivant synthétise le plan d'expérimentation mis en œuvre en fonction des milieux investigués et du type de résultats (en masse ou en concentration), ainsi que les durées d'exposition.

TABLEAU - SYNTHÈSE DU PLAN D'ÉCHANTILLONNAGE DES CAMPAGNES AVEC LES ÉCHANTILLONNEURS PASSIFS POUR L'AIR INTÉRIEUR ET EXTÉRIEUR

Échantillonneur (et abréviation utilisée dans la suite du rapport)	Air à l'intérieur et extérieur du bâtiment
	Nombre d'ouvrages et de campagnes, et durées d'exposition
Prélèvement passif	
BeSure® Sampler de BEACON (« EP BeSure Sampler – BEACON »)	- 1 lieu en intérieur, à deux hauteurs : 1 campagne de 6 jours et 1 campagne de 8 jours
SPG 0008 de AGI® Survey (« EP SPG-0008 – AGI »)	
TIPS de AGI® Survey (en développement) (« EP TIPS – AGI »)	
Tube passif avec adsorbant Chromosorb 106 sans tête de diffusion de BEACON (« EP tube avec Chromosorb 106 – BEACON »)	- 1 lieu en intérieur, à une hauteur : 1 campagne avec 3 durées d'exposition : 1, 2, 6 jours
Tube passif avec adsorbant Radiello® 145 avec tête de diffusion conditionné par l'INERIS (développement INERIS) (« EP tube avec Radiello 145 »)	- 1 lieu en extérieur : 1 campagne de 6 jours et 1 campagne de 8 jours
Corps diffusif avec adsorbant Radiello® 145 (« EP corps diffusif avec Radiello 145 »)	
Prélèvement dynamique	
Tube avec charbon actif – SKC 2 zones (« PA avec CA »)	- 8 heures (en début, au milieu, en fin de la période des EP) - 24 heures (en début, en fin de la période des EP)
Légende	
EP : échantillonneur passif ; PA : prélèvement actif.	

⁶⁷ Pour rappel cet EP ne donne que des résultats en masse, et ses résultats en masse ne seront pas décrits dans cette section traitant des concentrations dans l'air.

Le protocole expérimental de mise en œuvre pour l'air intérieur et extérieur a été le suivant, les EP ayant été préparés et mis en place⁶⁸ et reconditionnés comme mentionné par les fournisseurs :

- ils ont été suspendus respectivement sur un trépied ou à un support existant et protégés par un « auvent » en cas de pluie ;
- des prélèvements dynamiques avec charbon actif ont également été mis en œuvre sur des durées de 8h ou 24h chevauchant les périodes de début et de fin, ou intermédiaires de prélèvements passifs, l'objectif étant de mettre en perspective les concentrations issues des prélèvements passifs. Ce prélèvement dynamique avec charbon actif est considéré, dans le protocole expérimental comme un prélèvement de référence des échantillonneurs passifs. Au regard de la faible variabilité temporelle des concentrations observée lors des mesures réalisées ce choix apparaît satisfaisant.

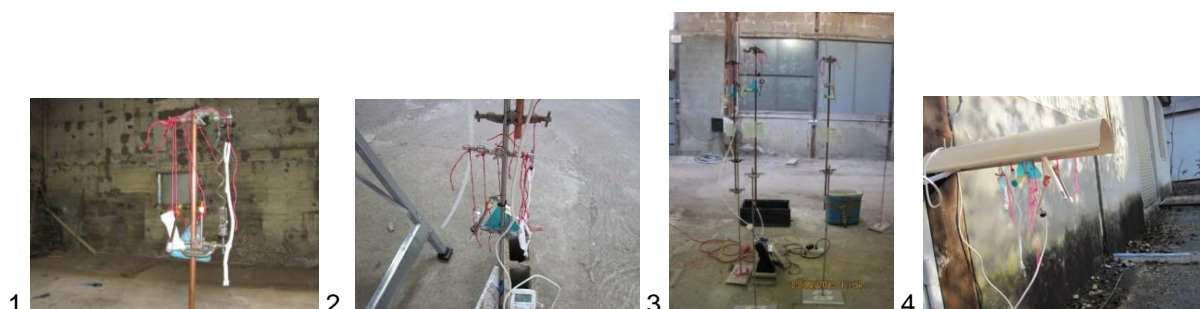


FIGURE - ILLUSTRATION DE LA MISE EN ŒUVRE DES ECHANTILLONNEURS PASSIFS DANS L'AIR INTERIEUR DU BATIMENT (PHOTOGRAPHIES 1 A 3) ET EN EXTERIEUR (PHOTOGRAPHIE 4)

En termes de paramètres environnementaux, les mesures de la température et de l'humidité ont été réalisées avec des sondes thermo-hygrométriques KISTOCK KTH 350 ou KH 210 de la marque KIMO, et particulièrement pour l'air intérieur et extérieur, durant la durée des prélèvements.

En ce qui concerne la vitesse du vent (nécessaire plus particulièrement dans le cas des mesures en air extérieur), elle a été approchée par les résultats de la station météorologique mise en place sur le site.

Paramètres environnementaux

Les valeurs des paramètres environnementaux (température et humidité) sont synthétisées dans le tableau suivant.

TABLEAU - PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX (TEMPERATURE ET HUMIDITE) POUR LES PRELEVEMENTS D'AIR A L'INTERIEUR ET A L'EXTERIEUR DU BATIMENT POUR LES TROIS CAMPAGNES

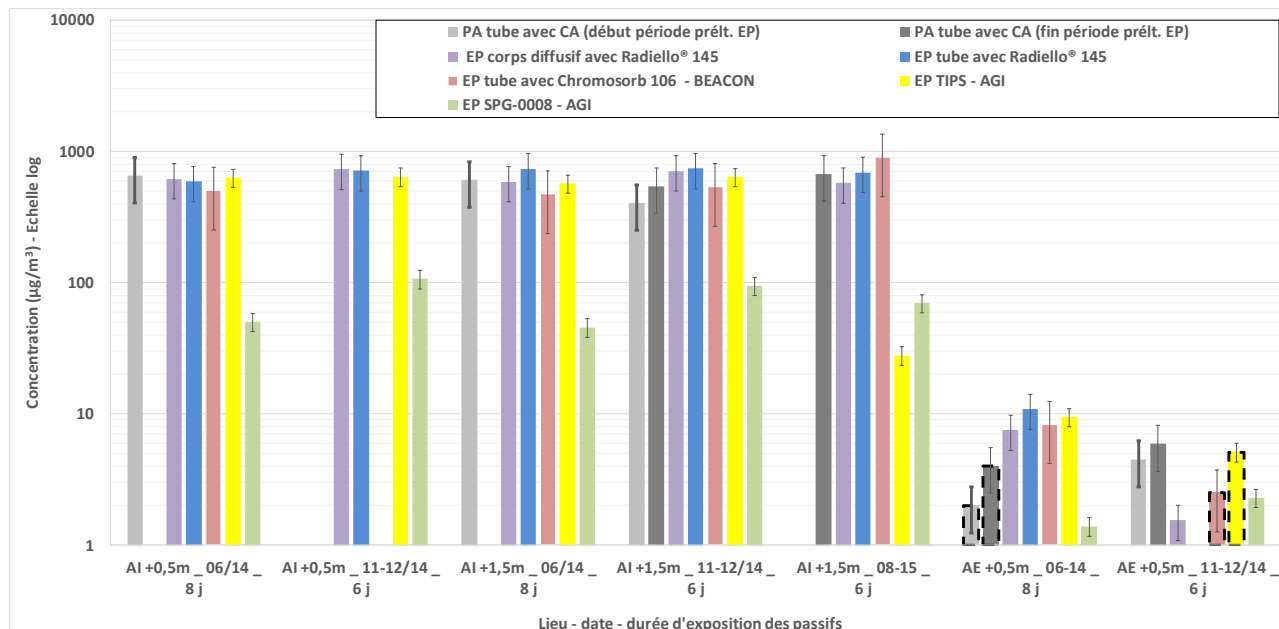
Type de prélèvement	Référence du lieu	Juin 2014		Novembre-décembre 2014		Août 2015	
		Température moyenne (°C)	Humidité moyenne (%)	Température moyenne (°C)	Humidité moyenne (%)	Température moyenne (°C)	Humidité moyenne (%)
air intérieur	AA Int-50	16,0	90,0	-	-	n.c.	n.c.
	AAi-150-1	16,0	90,0	22,1	38,9	30,5	50,0
	AAi-150-2	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	31,2	60,0
	AAi-150-3	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	30,4	58,5
air extérieur	AA Ext-50	24,4	410	7,9	88,6	n.c.	n.c.

Légende
n.c. : lieu non concerné par cette campagne ; - : pas de mesures

⁶⁸ Les protocoles de préparation et de mise en place ne sont pas repris dans ce rapport, le lecteur se reportera aux références citées.

Comportements des échantillonneurs passifs en fonction des gammes de concentration

La Figure ci-après associée aux prélèvements en différents lieux et campagnes, met en regard les concentrations issues des prélèvements passifs réalisés sur une durée de 6 ou 8 jours, ainsi que celles issues des prélèvements dynamiques.



Légende

PA : prélèvement actif ; CA : charbon actif ; EP : échantillonneurs passifs ; AI : air à l'intérieur du bâtiment ; AE : air à l'extérieur du bâtiment ;

Bâtonnet avec le contour en pointillé noir : le résultat de l'analyse est estimé, compris entre la limite de détection et la limite de quantification (LQ), la valeur retenue dans la figure correspondant à la LQ.

FIGURE - RESULTATS EN CONCENTRATION POUR LE PCE AVEC LES ECHANTILLONNEURS PASSIFS POUR UNE EXPOSITION DE 6 OU 8 JOURS ET CELLES DES PRELEVEMENTS DYNAMIQUES

Gamme de concentrations de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (air à l'extérieur du bâtiment) :

Lors de la campagne de juin 2014, les concentrations des différents échantillonneurs passifs, de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sont identiques, tenant compte des incertitudes analytiques, à l'exception du « EP SPG-0008 - AGI ». La mise en perspective des concentrations des échantillonneurs passifs avec celles des prélèvements dynamiques avec charbon actif, dans ce cas est plus délicate en présence uniquement de résultats inférieurs aux LQ, ces dernières étant par ailleurs inférieures aux concentrations des EP.

Dans le cas de la campagne d'hiver 2016, seuls les « EP corps diffusif avec Radiello 145 », « EP tube avec chromosorb 106 - BEACON » et « EP SPG-0008 - AGI » indiquent des concentrations similaires, tenant compte des incertitudes analytiques. Le « EP tube avec Radiello 145 » quant à lui indique une concentration supérieure de plus de 2 ordres de grandeur. Cependant, pour ce dernier, il est à mentionner que le laboratoire a indiqué que cette concentration a pu être surestimée lors de l'analyse. Quant au « EP TIPS - AGI », sa concentration est supérieure à celles des échantillonneurs précités. Il est à souligner que la valeur indiquée correspond à la limite de quantification ; cette valeur ayant été retenue dans le cadre de ces illustrations lors de la mention par le laboratoire d'un résultat compris entre la limite de détection et la LQ. En ce qui concerne la mise en perspective des résultats des passifs avec les prélèvements dynamiques avec charbon actif, dans ce cas, les concentrations de ces derniers apparaissent globalement supérieures, avec cependant une interprétation plus nuancée au regard des concentrations proches des LQ auxquelles sont associées des incertitudes plus importantes.

Les observations issues de cette campagne hivernale pour les prélèvements réalisés en extérieur, ne peuvent être mises en lien avec des conditions climatiques.

Gamme de concentrations de plusieurs centaines de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (400 à 700 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) (air à l'intérieur du bâtiment) :

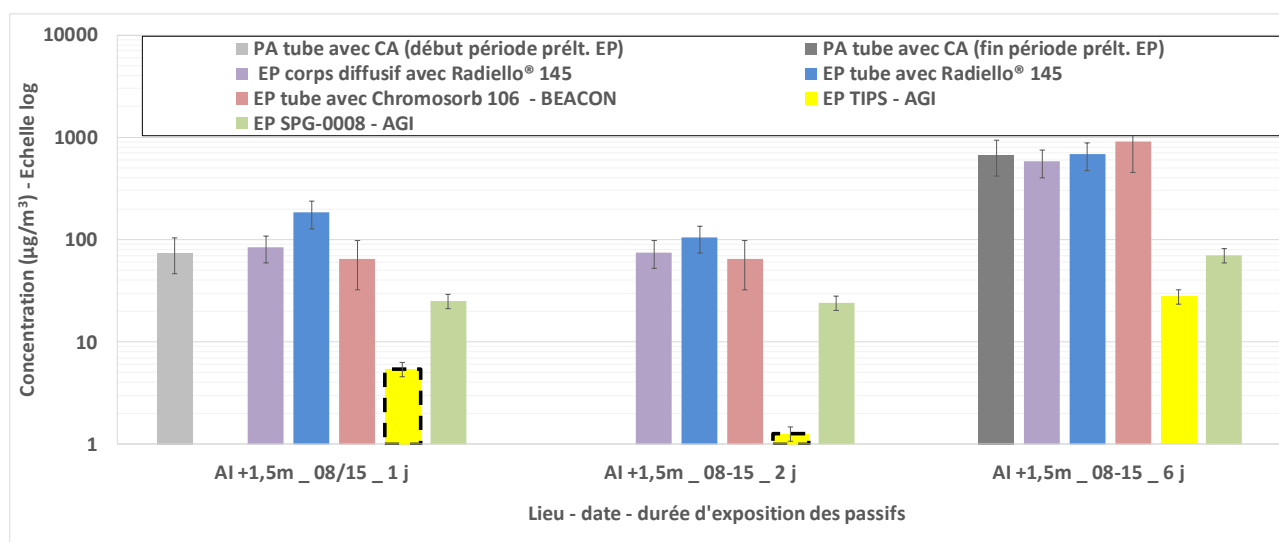
Les concentrations des « EP corps diffusif avec Radiello 145 », « EP tube avec chromosorb 106 - BEACON », « EP tube avec Radiello® 145, sont similaires, tenant compte des incertitudes analytiques, à l'exception des « EP SPG-0008 - AGI » pour toutes les campagnes, et du « EP TIPS - AGI » uniquement pour celle d'août 2015, dont les concentrations sont de plus d'un ordre de grandeur inférieures.

Hormis les exceptions précitées, les concentrations observées avec les échantillonneurs passifs sont similaires à celles associées aux prélèvements dynamiques avec charbon actif réalisés en début et fin de périodes de prélèvements passifs.

Comportements des EP en termes de durées d'exposition

Un des tests réalisés en août 2015 concernait des durées d'exposition de 1, 2 et 6 jours, avec le début de la période d'exposition identique pour les EP, un prélèvement dynamique ayant été réalisé les premières 24h et le second de 24h en parallèle des dernières 12h d'exposition des EP.

La figure suivante illustre les résultats des concentrations allant d'une 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au mg/m^3 , issus de trois périodes de prélèvement de 1, 2 et 6 jours, ayant débuté en même temps au lieu AA et à une hauteur de 1,5 m.



Légende

PA : prélèvement actif ; CA : charbon actif ; EP : échantillonneurs passifs ; AI : air à l'intérieur du bâtiment ; AE : air à l'extérieur du bâtiment ;

Bâtonnet avec le contour en pointillé noir : le résultat de l'analyse est estimé, compris entre la limite de détection et la limite de quantification (LQ), la valeur retenue dans la figure correspondant à la LQ.

FIGURE - RESULTATS EN CONCENTRATION POUR LE PCE AVEC LES ECHANTILLONNEURS PASSIFS POUR UNE EXPOSITION DE 1, 6 OU 8 JOURS ET CELLES DES PRELEVEMENTS DYNAMIQUES

Cette figure met en évidence, tenant compte des incertitudes analytiques, dans le cas des durées d'exposition suivantes de :

- **6 jours** : des concentrations similaires, pour les « EP corps diffusif avec Radiello 145 », « EP tube avec Radiello 145 » et « EP tube avec chromosorb 106 - BEACON ». Elles sont également similaires à la concentration du prélèvement passif réalisé en fin de période, et supérieures à celle du début de période. Quant aux « EP SPG-0008 - AGI » et « EP TIPS - AGI », ils indiquent des concentrations inférieures de plus d'un ordre de grandeur ;
- **2 jours** : la tendance pour les « EP corps diffusif avec Radiello 145 », « EP tube avec Radiello 145 », « EP tube avec chromosorb 106 - BEACON » et « EP SPG-0008 - AGI » est similaire à celle observée pour le prélèvement de 6 jours, avec toujours une sous-estimation des concentrations pour l'« EP SPG-0008 - AGI », de l'ordre d'un facteur 5. Le résultat du « EP TIPS - AGI » est quant à lui inférieur à la limite de quantification ;

- **1 jour** : des tendances similaires sont observées, avec cependant, une concentration du « *EP tube avec Radiello 145* » légèrement supérieure aux gammes de concentrations des autres échantillonneurs passifs.

Globalement, la mise en perspective des concentrations avec les échantillonneurs passifs avec celles des prélèvements dynamiques mis en place en début et fin de période de prélèvement des passifs indiquent des concentrations similaires, à l'exception des cas précités des « *EP SPG-0008 - AGI* » et « *EP TIPS - AGI* ».

Conclusions

Les résultats des expérimentations des campagnes de mesures dans l'air à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment, pour des gammes de concentrations en PCE allant de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à $700 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et des durées d'exposition de 1, 2, 6 ou 8 jours (cf. Tableau ci-après), fournissent plusieurs éléments d'information par rapport aux prélèvements dynamiques avec charbon actif, pris comme référence compte tenu de la faible variabilité temporelle observée dans l'air à l'intérieur du bâtiment.

Pour des faibles concentrations, de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$, et une durée d'exposition de 6 jours, les concentrations mesurées avec l'ensemble des échantillonneurs utilisés sont globalement similaires et dans la gamme des concentrations mesurées par les prélèvements dynamiques avec charbon actif. Pour la durée de 8 jours, toutes les concentrations sont dans la même gamme de valeurs.

Pour des gammes de concentration plus élevées, de l'ordre de plusieurs centaines de $\mu\text{g}/\text{m}^3$, et les mêmes durées d'exposition (6 et 8 jours), tous les échantillonneurs indiquent des concentrations similaires à l'exception du « *EP SPG-0008 - AGI* ».

Pour des concentrations, de quelques dizaines de $\mu\text{g}/\text{m}^3$, et les durées d'exposition de 1 et 2 jours, seuls les « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* » et « *EP corps diffusif avec Radiello 145* » donnent des résultats similaires et dans la gamme des concentrations mesurées par les prélèvements dynamiques avec charbon. Pour les autres échantillonneurs, elles sont dans la même gamme de concentrations, à l'exception du « *EP TIPS - AGI* » avec des valeurs inférieures.

Ainsi, l'« *EP TIPS – AGI* » n'apparaît pas approprié pour la caractérisation de faibles concentrations de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pendant de faibles durées d'exposition. Quant aux « *EP SPG-0008 - AGI* », ils sous-estiment les concentrations obtenues avec les prélèvements dynamiques sur charbon, pour des gammes moyennes de concentrations de $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et des durées d'exposition de 6 à 8 jours.

Les résultats associés aux « *EP tube avec chromosorb 106 - BEACON* », « *EP tube avec Radiello 145* » et « *EP corps diffusif avec Radiello 145* » apparaissent globalement satisfaisants, quelles que soient les durées et gammes de concentrations⁶⁹.

Pour rappel, les « *EP corps diffusif avec Radiello 145* » et « *EP tube avec Radiello 145* » sont déjà éprouvés en France dans les études de caractérisation de la qualité de l'air à l'intérieur de bâtiment, même si le second est d'utilisation moins courante.

En termes de perspectives, des travaux complémentaires seraient à conduire avec d'autres gammes de concentrations et durées d'expositions et en présence de plusieurs substances correspondant aux situations classiquement rencontrées dans les études SSP.

⁶⁹ Pour rappel, le Radiello® 145 d'après le fournisseur est adapté pour des durées d'exposition de 7 jours.

TABLEAU - SYNTHÈSE DES MESURES EN TERMES DE GAMMES DE CONCENTRATION DANS L'AIR À L'INTÉRIEUR ET EXTÉRIEUR DU BATIMENT – PROJET TEMPAIR

Concentration de « référence », PA avec CA : moyenne (début - fin des prélèvements des EP) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] (I.A.= 27%)	Durée d'exposition des EP [jour]	Concentration des EP [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]					
		EP SPG-0008 <i>Amplified Geochemical Imaging - AGI (USA)</i> (I.A.= 16%)	EP TIPS (en développement) <i>Amplified Geochemical Imaging - AGI (USA)</i> (I.A.= 16%)		EP tube avec adsorbant chromosorb 106 <i>BEACON Environnemental Service (USA)</i> (I.A.= 50%)	EP tube avec adsorbant Radiello 145 <i>(INERIS, développement interne)</i> (I.A.= 30%)	EP corps diffusif avec adsorbant Radiello 145 (I.A.= 30%)
75 (75 -)	1	26	< 5,4		65	183	84
75 (75 -)	2	24	< 1,3		65	105	75
506 (405 - 608)	6	70 - 107	643	28	540 - 909	680 - 743	579 - 712 (**)- 733 (**)
632 (632 -)	8	46 - 50 (I)	571 - 633		476 - 504	593 - 740	589 - 619
5 (4,5 - 5,9)	6	2,3	< 5,1		< 2,5	-	1,5
506 (405 - 608)		70 - 107	643	28	540 - 909	680 - 743	579 - 712 (**)- 733 (**)
3 (< 2,0 - < 4,0)	8	1,4	9,5		8,3	11	7,5
632 (632 -)		46 - 50	571 - 633		476 - 504	593 - 740	589 - 619
Légende							
EP : échantillonneur passif ; PA : prélèvement actif ; CA : charbon actif ; I.A. : incertitude analytique ; < X : valeur inférieure à la limite de quantification égale à X ; - : EP non utilisé ; (**) : valeurs qualifiées par le laboratoire comme des valeurs estimées (sur ou sous-estimation potentielle au regard de la capacité de l'adsorbant Radiello 145).							
Concentration de l'EP au regard de la « concentration de référence » tenant compte des incertitudes analytiques :							
similaire		variation < facteur 5 [(I) : cas avec un facteur compris entre 5 et 10]			variation > facteur 10		

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la triple tutelle du ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et du ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable.

Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr

ABOUT ADEME

The French Environment and Energy Management Agency (ADEME) is a public agency under the joint authority of the Ministry for Ecology, Sustainable Development, Transport and Housing, the Ministry for Higher Education and Research, and the Ministry for Economy, Finance and Industry. The agency is active in the implementation of public policy in the areas of the environment, energy and sustainable development.

ADEME provides expertise and advisory services to businesses, local authorities and communities, government bodies and the public at large, to enable them to establish and consolidate their environmental action. As part of this work the agency helps finance projects, from research to implementation, in the areas of waste management, soil conservation, energy efficiency and renewable energy, air quality and noise abatement.

www.ademe.fr.

ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr