



**Quatrièmes Rencontres nationales  
de la **Recherche sur les sites et sols pollués****  
**26 et 27 novembre 2019, Le Beffroi de Montrouge**  
(Portes de Paris)

## **Variabilité des concentrations dans les gaz du sol et des flux vers l'air pour plusieurs situations**

**Sylvie TRAVERSE<sup>1</sup>, Juliette CHASTANET<sup>1</sup>, Corinne HULOT<sup>2</sup>, Jean-Marie CÔME<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> : Département R&D, GINGER-BURGEAP, 19 rue de la villette, 69425 LYON Cedex 03,  
[s.traverse@groupeginger.com](mailto:s.traverse@groupeginger.com), [j.chastanet@groupeginger.com](mailto:j.chastanet@groupeginger.com), [jm.come@groupeginger.com](mailto:jm.come@groupeginger.com)

<sup>2</sup> : INERIS, Parc Technologique ALATA - BP2 60550 Verneuil-en-Halatte, [corinne.hulot@ineris.fr](mailto:corinne.hulot@ineris.fr)

\* contact : [s.traverse@groupeginger.com](mailto:s.traverse@groupeginger.com)

### **Résumé**

L'établissement des mesures de gestion sur des sites pollués avec des composés organiques volatils (COV) nécessite une bonne caractérisation des concentrations tant dans les gaz du sol que dans l'air intérieur. Si la conduite de telles études est bien encadrée par des guides techniques [3], [4] et des normes ([2]), des incertitudes demeurent sur la représentativité de ces mesures inhérentes aux difficultés à faire le lien entre les facteurs de variabilité et les concentrations mesurées.

Les travaux présentés sont issus des projets EFEMAIR et TEMPAIR cofinancés par l'ADEME. Ils ont permis de mettre en exergue l'influence sur la représentativité spatiale et temporelle des concentrations dans les gaz du sol et dans l'air intérieur de certaines conditions hydrométéorologiques et de paramètres majeurs dans la modélisation actuelle des transferts vers l'air intérieur. Après la mise en évidence sur un site atelier des corrélations entre les concentrations et certaines de ces variables [5], une modélisation numérique de différentes situations a été conduite [6]. Dans ces travaux, les variables dont l'influence a été étudiée sont la localisation de la source de pollution, la perméabilité des terrains et de la dalle du bâtiment et la dépression générée par le chauffage du bâtiment. Vis-à-vis de la représentativité temporelle, ont été pris en compte des chroniques annuelles de pluie, de battement de nappe et de pression atmosphérique. Les travaux réalisés conduisent à recommander l'établissement d'un schéma de fonctionnement du système spécifiquement étudié qui peut permettre, en fonction de l'objectif visé, de mieux définir la localisation et les périodes des mesures et de mieux interpréter la représentativité.

### **Introduction**

La reconversion urbaine nécessite sur les sites à passif environnemental d'évaluer les risques sanitaires induits par l'existence de pollutions volatiles dans le milieu souterrain. L'établissement des mesures de gestion repose sur une caractérisation des concentrations dans les gaz du sol et, dans des bâtiments où la qualité de l'air intérieur est dégradée sur des mesures de concentrations dans l'air intérieur. A ce jour, la conduite des études est bien encadrée ([1], [2], [3], [4]), mais des difficultés persistent pour garantir la représentativité des mesures en raison de la grande variabilité temporelle et spatiale des concentrations gazeuses.

Les éléments présentés sont issus des projets TEMPAIR (2014-2016) [5] et EFEMAIR (2017-2018) [6] cofinancés par l'ADEME. Ils visent à analyser la variabilité temporelle et spatiale des concentrations d'une pollution volatile dans les gaz du sol et dans l'air intérieur au regard des facteurs environnementaux afin de proposer des recommandations complémentaires pour le dimensionnement et l'interprétation des diagnostics. Dans un premier temps, l'analyse s'est focalisée sur l'interprétation des mesures sur un site atelier. Dans un second temps, des modélisations numériques ont été réalisées afin d'élargir l'analyse des impacts sur les variations de concentrations (amplitudes, dynamiques) pour différentes situations en termes de nature de sol, de positionnement de la source de pollution et de perméabilité de la dalle du bâtiment.

## Matériel et méthodes

Le site atelier est un ancien site artisanal où une source de pollution, composée en majorité de tétrachloroéthylène (PCE), est présente dans les sols en limite de bâtiment. Les sols sont constitués d'une succession de remblais, limons et sables avec une nappe phréatique à environ 5m de profondeur. La dalle présente une perméabilité mesurée entre  $10^{-17}$  et  $10^{-12}$  m<sup>2</sup> et la ventilation est simple flux par extraction. Le site a été équipé dans le cadre du projet FLUXOBAT [4]. Parmi le réseau de piézaires, une vingtaine d'ouvrages, captant les différents horizons, ont été suivis pendant 1 an. Le site est par ailleurs équipé d'ouvrages et de dispositifs permettant le suivi des conditions hydrométéorologiques ainsi que de la température et la saturation en eau des sols. Afin d'identifier le rôle des variables météorologiques et du chauffage sur les concentrations, des campagnes de mesures ont été réalisées à différentes échelles : i. 13 campagnes ponctuelles de mesures par un détecteur à photoionisation sur les piézaires réparties sur une année (les résultats ont été validés par des prélèvements actifs sur charbon actifs  $r^2=0,84$ ) ; ii. plusieurs campagnes de suivi en continu sur plusieurs jours (de 2 à 10 jours) par un détecteur à photoionisation dans les gaz du sol et dans l'air intérieur.

Les données acquises sur le site ont été interprétées à l'aide de différentes approches statistiques (facteur de corrélation de Pearson, analyse en composantes principales et analyse en séries temporelles) et en s'appuyant sur la modélisation numérique.

Les modélisations numériques ont été réalisées en régime transitoire afin d'étudier l'impact des facteurs hydrométéorologiques sur la variabilité des concentrations et des flux. Dans un premier temps, le modèle a été construit dans la configuration du site atelier (source en limite de bâtiment, succession lithologique remblais / limons / sables). Dans un second temps, le travail de modélisation a été élargi à d'autres situations qui peuvent être rencontrées (cf. Tableau 1). Le logiciel SIMUSCOPP<sup>1</sup> a été utilisé pour ces modèles 2 D verticaux. Sont simulés les écoulements diphasiques eau-air et le transport par convection et dispersion jusqu'à une couche limite au-dessus des sols ou de la dalle. Les simulations s'étendent sur une année avec des conditions aux limites de pluie, de niveau de nappe et de pression atmosphérique variables. La source est représentée par un corps d'imprégnation (NAPL) immobile. Les résultats de modélisation interprétés sont les variations temporelles de concentrations ponctuelles, de concentrations moyennes sous dalle et des flux moyens vers l'air intérieur ou vers l'atmosphère.

**Tableau 1. Configurations modélisées [6]**

Position de la source	Lithologie	Qualité de la dalle (dalle portée)
- Verticale (zone d'infiltration) sous, en limite ou en dehors de l'emprise du bâtiment	- Hétérogène (remblais / limons / sables)	peu perméable ( $10^{-16}$ m <sup>2</sup> ) à perméable ( $10^{-12}$ m <sup>2</sup> )
- Horizontale (remblais dégradés) sous bâtiment	- Homogène sableux	
- Source en nappe	- Homogène limoneux	

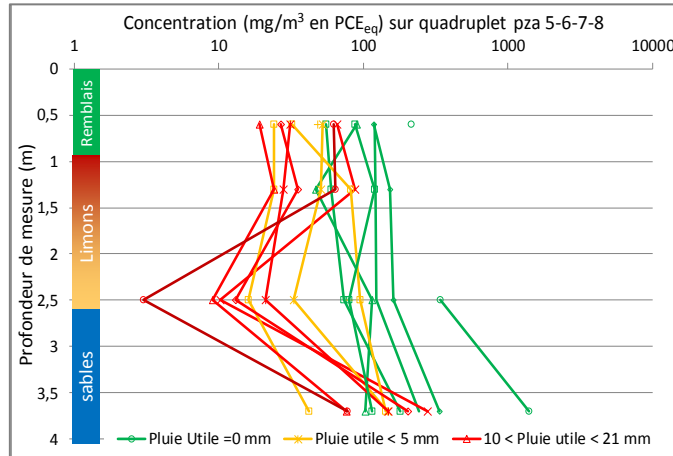
## Résultats et discussion

**Sur le site atelier**, les mesures dans les gaz du sol montrent une forte variabilité des concentrations avec, tant sous bâtiment qu'en périphérie, des amplitudes pouvant atteindre plusieurs ordres de grandeur. Au regard des différentes échelles d'observation, les variations les plus importantes sont identifiées entre les campagnes ponctuelles réparties sur une année (cf. Figure 1). Les variables météorologiques pour lesquelles une corrélation significative a pu être identifiée sont la température des sols, la pluie et le vent. Les influences des différentes variables étudiées prises séparément sont cependant complexes à interpréter, leur discrimination par la modélisation numérique a ainsi été conduite. Celle-ci a mis en évidence l'influence théorique de chacune de ces variables et les effets antagonistes ou synergiques lors de certains épisodes.

Dans l'air intérieur, les campagnes de mesures mettent en évidence des variations plus limitées (inférieures à un ordre de grandeur). Sur le site étudié, les concentrations dans l'air intérieur sont corrélées à l'ensemble des variables, les variables majeures étant le vent, la température, la dépression <sup>int-ext</sup> et le gradient thermique <sup>int-ext</sup>. Seule la dépression du bâtiment présente sur toutes les campagnes une corrélation positive avec les concentrations (cependant pas toujours significative). Pour les autres variables, il est observé l'absence de lien univoque avec les concentrations (corrélations positives ou négatives en fonction des campagnes).

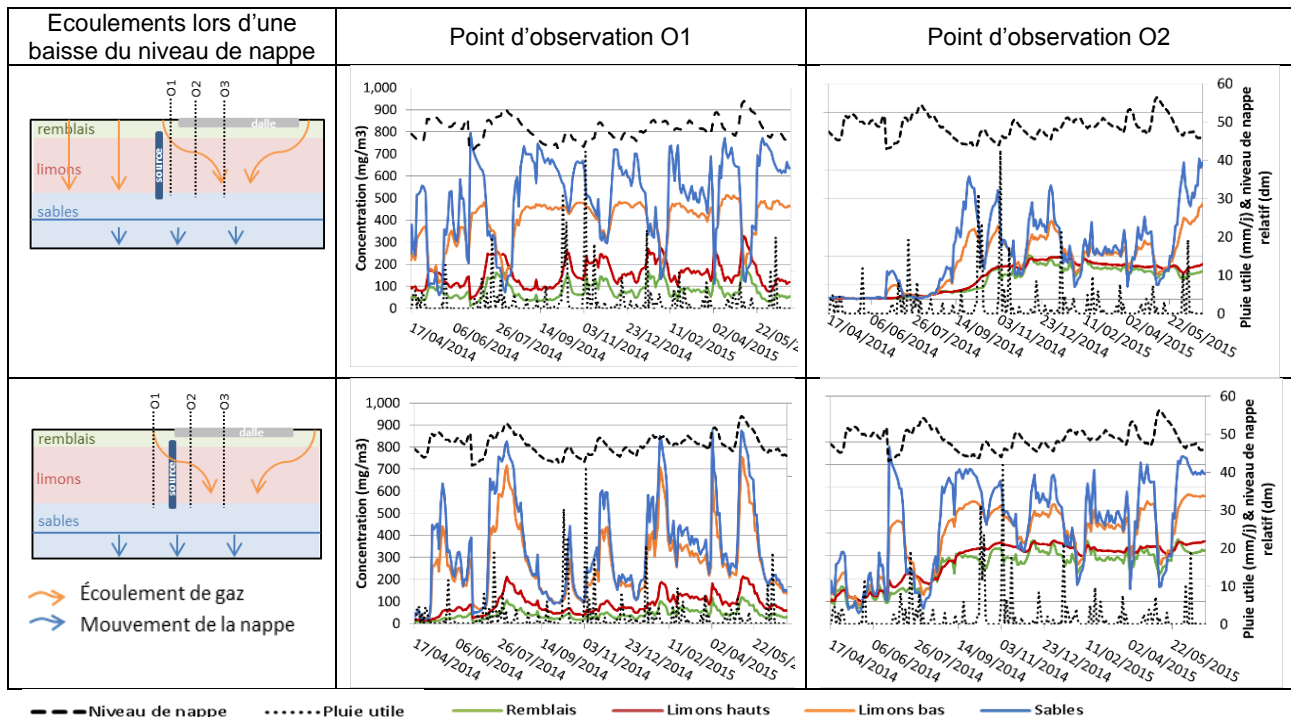
Ces résultats montrent la nécessité de considérer conjointement l'ensemble des variables et la compréhension des transferts des pollutions dans les gaz du sol pour interpréter la variabilité des concentrations observées.

<sup>1</sup> Logiciel propriétaire co-développé par l'IFP, ENI et BURGEAP



**Figure 1. Profils de concentrations en PCE mesurées sur un quadruplet de piezaires sur le site atelier pour différentes conditions de pluviométrie [5]**

Les travaux de modélisation pour différentes configurations de site mettent en évidence que les concentrations, les flux vers l'atmosphère et vers l'air intérieur ainsi que leurs variations sont fortement dépendants de ces configurations. La position relative de la source, les perméabilités relatives de la dalle et des sols modifient en effet la géométrie et la dynamique du panache de pollution gazeuse ainsi que les transferts vers l'air (voir Figure 2). Il est à noter que dans les configurations modélisées, le battement de nappe est le facteur prédominant de la variabilité temporelle des concentrations.



**Figure 2. Schémas de fonctionnement et évolution des concentrations en différentes localisations et pour différentes positions de la source [6]**

Le fait que la variabilité temporelle des concentrations dans les gaz du sol et des flux moyens à travers la dalle soit moins marquée que celle des concentrations ponctuelles conduit à recommander une répartition spatiale

adaptée des mesures. En outre, la variabilité temporelle étant la plus importante à proximité immédiate des zones dallées (hors dalle), la caractérisation de la pollution devrait, toutes choses égales par ailleurs, privilégier les prélèvements sous dalle éloignés de ses bords.

Vis-à-vis des transferts vers l'air intérieur, dans les modélisations réalisées, le tirage thermique influence peu les transferts moyens pour une dalle portée sans chemins préférentiels (non modélisés). Ces derniers, ainsi que la ventilation des bâtiments, constituent des facteurs de variabilité spatio-temporelle supplémentaires à prendre en compte pour l'interprétation des diagnostics [4].

## Conclusions et perspectives

Les travaux réalisés ont permis de préciser les ordres de grandeur de la variabilité temporelle et spatiale des concentrations dans les gaz du sol et dans l'air intérieur sur un site atelier et à travers la modélisation numérique pour différentes configurations de lithologie, de source et de caractéristiques de dalle. L'analyse des origines de la variabilité temporelle a permis de hiérarchiser l'importance des différents phénomènes (variations du niveau de nappe, de la pluie, du vent, de la température, ...). Bien que des corrélations ont été mises en évidence, l'absence de dépendance directe de chaque facteur avec les variations de concentration et l'importance dans ces corrélations des spécificités des sites donnent une portée limitée aux raisonnements génériques uni-factoriels pour l'interprétation de mesures.

Pour les gaz du sol, en complément des conditions hydrométéorologiques, la bonne connaissance de l'origine du panache de pollution, des lithologies, de l'hydrogéologie et des aménagements en surface est nécessaire pour une interprétation pertinente des mesures de concentrations.

Pour l'interprétation des teneurs dans l'air intérieur, les travaux réalisés montrent qu'au-delà de la connaissance des concentrations dans les gaz du sol et des caractéristiques des bâtiments et de leur ventilation, la compréhension des écoulements et du transport des pollutions dans les sols est également nécessaire.

Regroupant ces différents éléments, l'établissement d'un schéma de fonctionnement du système spécifiquement étudié permettrait, en fonction de l'objectif visé, de mieux définir la localisation et les périodes des mesures et ainsi de mieux interpréter la représentativité.

## Références

- [1] MTES (2017). Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués. 19 avril 2017. [www.installationsclassees.developpement-durable.gouv.fr/Outils-de-gestion.html](http://www.installationsclassees.developpement-durable.gouv.fr/Outils-de-gestion.html)
- [2] AFNOR (2017) Norme ISO 18400-204. Qualité du sol – échantillonnage – partie 204 : Lignes directrices pour l'échantillonnage des gaz du sol. Janvier 2017
- [3] 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. RP-65870-FR - DRC-16-156183-01401A - version 3.0- 25/11/2016.
- [4] 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.
- [5] Traverse S., Chastanet J., Pitaval D., Dorffer L., Gleize T., Hulot C., Richez F. (2017). TEMPAIR partie 1 – variabilité temporelle des concentrations en PCE dans les gaz du sol et l'air intérieur. Rapport ADEME. 59p.
- [6] Chastanet J., Traverse S., Côme JM. (2018). Variabilité des concentrations dans les gaz du sol et des transferts vers l'air intérieur des polluants volatils. Modélisations numériques de différentes configurations de sol, de pollution et de perméabilité de dalle de bâtiment. Projet EFEMAIR. Collection expertise ADEME. Mai 2018. 33pp

## Remerciements

Les auteurs remercient l'ADEME pour le cofinancement des projets et en particulier Franck MAROT et Yves DUCLOS pour le suivi des projets. Sont également remerciés l'ensemble des personnes ayant contribué aux projets EFEMAIR et TEMPAIR.