



mai
2018

PROJET EFEMAIR

AXE 1 - VARIABILITE DES CONCENTRATIONS DANS LES GAZ DU SOL ET DES TRANSFERTS VERS L'AIR INTERIEUR DES POLLUANTS VOLATILS

Modélisation numérique de différentes configurations de sol, de
pollution et de perméabilité de dalle de bâtiment

Rapport final
Document public

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie

Projet réalisé par BURGEAP : Juliette CHASTANET,
Sylvie TRAVERSE, Jean-Marie CÔME

REMERCIEMENTS

Est remerciée Lisa WEISS, qui dans le cadre de son stage MASTER II (Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre de l'Université de Strasbourg) a contribué à la réalisation du projet.

Les auteurs remercient l'ADEME pour le co-financement et l'accompagnement du projet EFEMAIR.

CITATION DE CE RAPPORT

Chastanet J., Traverse S., Côme JM. (2018). Axe 1-Variabilité des concentrations dans les gaz du sol et des transferts vers l'air intérieur des polluants volatils. Modélisation numérique de différentes configurations de sol, de pollution et de perméabilité de dalle de bâtiment. Projet EFEMAIR. Collection expertise ADEME. Mai 2018. 33pp.

Cet ouvrage est disponible en ligne sur www.ademe.fr/mediatheque et sur www.burgeap.fr/innovations/

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 le 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.

Ce document est diffusé par l'ADEME

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

Projet de recherche co-financé par l'ADEME (Décision de financement n°1672C0022) et réalisé par :

BURGEAP : CHASTANET Juliette, TRAVERSE Sylvie, CÔME Jean Marie

Coordination technique - ADEME : Coordination technique : Franck MAROT, Service Friches Urbaines et Sites Pollués – SFUSP – Direction Villes et Territoires Durables – ADEME Angers



TABLE DES MATIERES

Résumé	4
Abstract	6
1. Contexte du projet.....	7
2. Présentation de la modélisation.....	8
2.1 Caractéristiques principales du modèle	8
2.2 Variations des conditions aux limites : facteur d'influence.....	9
2.3 Situations modélisées	10
3. Fonctionnement global du système	11
3.1 Temps caractéristiques de stabilisation du panache et durée de la source	11
3.2 Bilan de flux d'eau et de gaz	12
3.3 Mécanismes convectifs et diffusifs de transport à travers la dalle	13
3.4 Hétérogénéités des débits d'air et des débits massiques à travers la dalle	14
4. Comparaison des situations modélisées	17
4.1 Variabilité des concentrations dans les gaz du sol	17
4.1.1 Concentrations ponctuelles	17
4.1.2 Concentrations moyennes sous dalle.....	20
4.2 Variabilité des transferts vers la surface	21
4.2.1 Flux de polluant à travers la dalle.....	21
4.2.2 Flux de polluant vers l'atmosphère.....	23
4.3 Importance relative des facteurs d'influence.....	24
4.4 Influence du tirage thermique.....	25
5. Conclusions et recommandations.....	29
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES	32
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	33



Résumé

La présence de pollutions volatiles organiques sur les sites à passif environnemental nécessite de réaliser des diagnostics dans les gaz du sol et dans l'air intérieur en présence de bâtiment. Si la conduite de telles études est bien encadrée par des guides techniques (MTES 2017, FLUXOBAT 2013, BRGM-INERIS 2016) et des normes sur la réalisation de mesures (dont ISO 18400-204, 2017 pour les gaz du sol), des incertitudes demeurent sur la représentativité de ces mesures (TEMPAIR, 2017). L'axe 1 du projet EFEMAIR¹ vise à mettre en exergue, pour différentes situations, les conséquences des épisodes de pluie successifs, de variations de pression atmosphérique et de variations de niveau de nappe sur les concentrations dans les gaz du sol et les flux vers l'air intérieur ou extérieur. Cette analyse repose sur la modélisation numérique instationnaire, en 2 dimensions, des écoulements et du transport de pollutions gazeuses dans les sols et vers les compartiments air intérieur et extérieur sur une année environ.

Les situations testées sont décrites ci-dessous. L'analyse a porté sur la variabilité des concentrations ponctuelles et moyennes dans les gaz du sol, des flux de polluant à travers la dalle et vers l'atmosphère.

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

Le principal enseignement des travaux est que les concentrations, les flux vers l'atmosphère et vers l'air intérieur et leurs variations sont fortement dépendants du site, en fonction de la position relative de la source et des zones dallées, des perméabilités relatives de la dalle et des sols. Il est ainsi primordial, afin de pouvoir interpréter les mesures, de comprendre le fonctionnement du système considéré. Ceci nécessite d'acquérir une bonne connaissance de l'origine du panache de pollution, des lithologies, de l'hydrogéologie, des aménagements en surface (revêtements, bâtiments) et de leurs caractéristiques (qualité, ventilation, ...).

Concernant les facteurs hydro-météorologiques, dans les configurations modélisées, le battement de nappe est le facteur prédominant de variabilité des concentrations dans les gaz du sol et des transferts vers la surface, la pluie et la pression atmosphérique ayant une influence moindre mais néanmoins non négligeable. Il est donc recommandé de mesurer ces trois facteurs hydro-météorologiques et de connaître l'historique précédent la campagne pour interpréter des mesures.

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 bonne spatialisation des mesures. En outre, la variabilité temporelle étant la plus importante à proximité immédiate des zones dallées (hors dalle), la cartographie de la pollution devra, toutes choses égales par ailleurs, privilégier les prélèvements sous dalle éloignés de ses limites.

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 hétérogénéités ou comprenant des chemins préférentiels (fissures de retrait, traversées de dalle par les réseaux divers : eau, gaz, électricité, ...). Ces derniers, ainsi que la ventilation des bâtiments, constituent des facteurs de variabilité spatio-temporelle non modélisés dans le projet mais à prendre en compte pour la mesure et l'interprétation des diagnostics (FLUXOBAT, 2013).

Enfin, les modélisations conduites montrent que le flux vers l'air atmosphérique en l'absence de recouvrement des sols est fortement influencé par les facteurs hydro-météorologiques : sur une année, les variations temporelles observées peuvent atteindre pour certaines configurations 3 ordres de grandeur.

Mots clés :

COV, pollution de sol, air intérieur, air atmosphérique, modélisation numérique instationnaire, facteur hydrométéorologiques, schéma de fonctionnement

¹ L'axe 2 du projet EFEMAIR traite de la compétition d'adsorption entre hydrocarbures et humidité lors des prélèvements de gaz du sol





Abstract

Diagnostics on soil gas and indoor air are needed when dealing with volatile compounds on contaminated sites. Several methodological guides (MTES 2017, FLUXOBAT, 2013, BRGM-INERIS 2016) are available to conduct such studies and norms exist for soil gas sampling (including ISO 18400-204, 2017). But uncertainties remain today on the representativeness of these measurements (TEMPAIR, 2017). The so called EFEMAIR project aims at bringing out the consequences of successive rainfall episodes, atmospheric pressure variations and groundwater level fluctuations on soil gas concentrations and transfers in various situations (cf. table below). This work is based on 2D numerical simulations in which transient water and gas flow as well as gaseous contaminant transport are described in the vadose zone and toward indoor and outdoor air during a year. Results consists in considering the variability of averaged and punctual soil gas concentrations as well mass rates of contaminant through the slab (toward indoor space) and toward atmosphere.

Source localisation	Lithology	Slab Quality (slab-on-grade)
<ul style="list-style-type: none">- Vertical (infiltration zone) under, at the limit or out of the extent of a building- Horizontal (contaminated backfill) under the building- Groundwater source contamination	<ul style="list-style-type: none">- Heterogeneous (backfill / silts / sands)- Homogeneous (sand)- Homogeneous (silt)	From low permeable slab (10^{-16} m ²) to high permeable slab (10^{-12} m ²)

The main conclusion is that concentrations, fluxes and their variations are strongly related to the site configuration. They can be very different according to the relative position of the source zone and slab(s) and to the relative permeabilities between slab and soil. The understanding of the system is primordial to be able to interpret the measurements. Hence a maximum of knowledge about the origin of the gaseous contamination, the lithology, the hydrogeology, the layout at the surface (pavement, buildings, ...) and their characteristics (quality of the slab, ventilation, ...) must be collected.

Regarding the influence of the hydro-meteorological factors, the groundwater fluctuation induces the most important variability of soil gas concentrations and fluxes toward the surface in the simulated configurations. The influences of rain and atmospheric pressure variations are less important but non-negligible. Consequently, it is important to measure these three factors and their evolution few days before the measurements in order to interpret them.

Considering that the temporal variability of averaged soil gas concentrations and averaged fluxes through the slab are less important than the temporal variability of punctual concentrations, it is recommended to well spatialized the measurements. Besides the temporal variability is high on the outskirts of the covered zones : the contaminant characterization must then focus on the sub-slab sampling far from their limits.

About fluxes toward indoor air, the modeled stack effect appears to have a small influence on the averaged transfer fluxes in the case of a slab-on-grade when there is no cracks or preferential pathways (service ducts for electricity, gas, water, ...). The later factors together with the ventilation of the building are not modeled in the project, they are factors of high spatiotemporal variability and must be investigated for indoor air and soil gas measurements and interpretation.

At last the simulations highlight that the contaminant fluxes toward uncovered surfaces is highly dependent on hydro-meteorological factors. On the simulated year, the variations of fluxes reach a maximum of 3 orders of magnitude.

Key words :

VOC, soil contamination, indoor air, atmospheric air, transient numerical simulations, hydro-meteorological factors, operating sketch



1. Contexte du projet

La question des transferts de polluants organiques volatils des sols vers l'air se pose lors de la gestion de la majorité des terrains présentant un passif environnemental.

La présence de pollutions volatiles organiques nécessite dès lors la conduite de diagnostics dans les gaz du sol (MTES, 2017). En effet en complément des mesures réalisées sur les sols et les eaux souterraines, la connaissance des concentrations dans les gaz du sol permet l'intégration spatiale du transport des polluants dans le milieu souterrain. Cependant, un certain nombre de considérations sont nécessaires lors de la conduite et l'interprétation de telles mesures (FLUXOBAT, 2013, BRGM-INERIS, 2016, Traverse et al. 2017). En particulier, les hétérogénéités spatiales nécessitent un dimensionnement adapté des campagnes. A l'heure actuelle, des interrogations perdurent sur la densité des mesures, leur représentativité spatiale et l'interprétation en lien avec les conditions environnementales. L'analyse conduite dans le cadre de projets précédents (Traverse et al. 2013 et 2017) a montré des variations de 2 à 3 ordres de grandeur sous un atelier de 160 m². Par ailleurs, la variabilité temporelle des concentrations dans les gaz du sol du fait des conditions hydrométéorologiques également identifiée dans le cadre des projets précités conduit à recommander la conduite de plusieurs campagnes de mesure et l'acquisition des variables influençant les concentrations. Il demeure cependant des difficultés pour les praticiens à établir le schéma de fonctionnement des sites qui permettrait d'appréhender l'influence de ces variables et ainsi interpréter les campagnes de mesure. Cela est lié aux influences synergiques et antagonistes qui ne peuvent être généralisées car elles dépendent de nombreux facteurs (lithologie et la localisation de la source de pollution et du recouvrement des sols...) qu'il convient d'intégrer au travers de l'analyse spécifique du fonctionnement du site étudié.

Dans les bâtiments impactés ou suspectés de l'être par des pollutions provenant du sol, qu'ils soient situés au droit d'une source de pollution ou dans le panache de migration de la pollution, l'estimation des impacts doit reposer sur des mesures de concentrations dans l'air intérieur (MTES, 2017). Cependant, la variabilité temporelle et spatiale de ces concentrations liée à la géométrie du panache de pollution dans les sols et aux variations des flux vers l'air intérieur et dépendant des conditions hydrométéorologiques rend délicat l'analyse de la représentativité des mesures. Des recommandations sont formulées dans les différents guides et documents mentionnés ci-avant pour le dimensionnement, la mise en œuvre et l'interprétation de telles mesures qui doivent tenir compte de la source particulière qu'est un sol pollué : conduite a minima de 2 ou 3 campagnes sur des périodes les plus longues possibles. Toutefois, compte tenu de la grande variabilité temporelle de ces concentrations qui dépend du site étudié, du bâtiment et de sa ventilation, il demeure pour les praticiens des difficultés de dimensionnement et d'interprétation.

Dans ce contexte, le projet EFEMAIR vise à mettre en exergue au travers de modélisations numériques et pour différentes situations (appelés cas type) les conséquences des épisodes de pluie, de variations de pression atmosphérique et de variation de niveau de nappe sur les concentrations dans les gaz du sol et les flux vers l'air intérieur ou extérieur. Les cas type permettent de distinguer les contextes lithologiques, de localisation de la source, de perméabilité de la dalle du bâtiment qui auront des influences d'une part sur le panache de pollution et les transferts et d'autre part sur les variations induites par les facteurs météorologiques étudiés. L'objectif des travaux ici présentés est *in fine* de fournir des clés pour les praticiens sur le dimensionnement et l'interprétation des diagnostics dans les gaz du sol et dans l'air intérieur sur des sites pollués ou suspectés de l'être.



2. Présentation de la modélisation

La modélisation numérique mise en œuvre vise à estimer l'impact de la pluie, des variations de niveau de nappe et de la pression atmosphérique sur le panache de pollution dans les gaz du sol et des flux vers la surface, que ce soit vers l'air intérieur à travers une dalle ou vers l'atmosphère. Le modèle utilisé ici présente les mêmes caractéristiques que celui utilisé dans le projet TEMPAIR (Traverse et al, 2017). Il est réalisé avec le code de calcul SIMUSCOPPP², les éléments principaux sont rappelés dans la section suivante.

2.1 Caractéristiques principales du modèle

Les caractéristiques principales sont les suivantes :

- le modèle est en 2 dimensions (coupe verticale). Il couvre essentiellement la zone non saturée sur une épaisseur de 5 m environ, une nappe dont le niveau fluctue et une couche limite d'air à la surface (couche limite de 20cm). Les dimensions et conditions aux limites sont présentés sur la Figure 1 ;
- sont modélisées les mécanismes d'écoulement de gaz et d'eau dans la zone non saturée (ZNS), la présence de NAPL (phase organique) immobile, la volatilisation et la dissolution et le transport d'une unique espèce dans le gaz et dans l'eau (convection-dispersion) ;
- une dalle de 80m de long est introduite pour représenter un bâtiment. La dalle est considérée comme un milieu poreux (sans fissure de retrait ni fissures majeures, lieux potentiels de chemins préférentiels). Sa position varie en fonction des situations (cf. Figure 4). Aucune fondation n'est représentée dans les modélisations présentées ici. Notons qu'un test avec fondation (de 40cm de profondeur) a été néanmoins conduit (non présenté) : il a montré que les fondations ont peu d'influence sur le fonctionnement moyen du système (en termes de concentration moyenne sous dalle et de flux vers la surface).

Notons que la Figure 1 présente une des situations testées (source verticale placée en limite de dalle), les autres situations sont présentées dans la suite du document (chapitre 2.3).

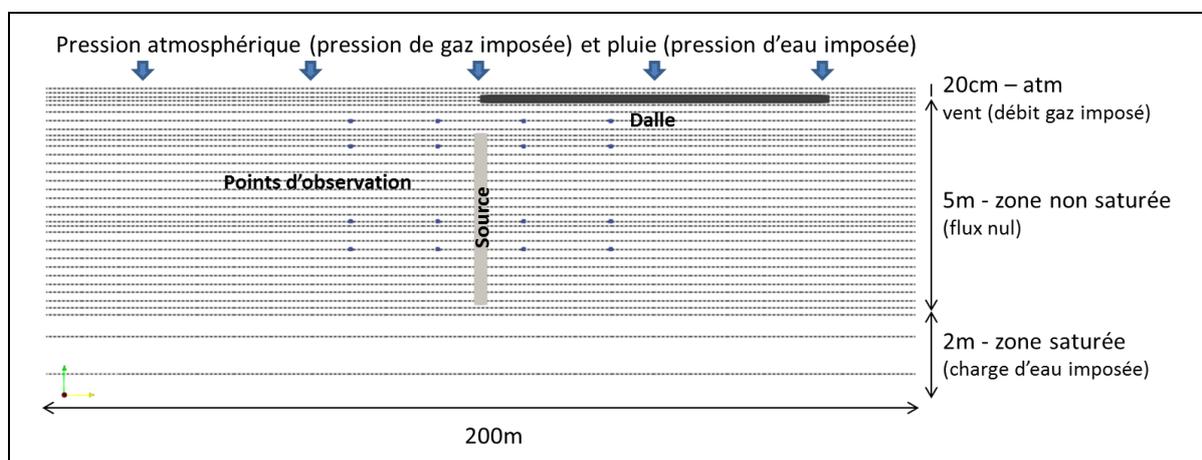


Figure 1 – Géométrie et conditions aux limites du modèle

² SIMUSCOPP (SIMULATION des Sites Contaminés par des Produits Pétroliers) a été co-développé par l'Institut Français du Pétrole (IFP), BURGEAP et ENI dans le cadre d'un programme européen. Le code est basé sur la méthode des volumes finis. Il permet de modéliser en 2D ou 3D les écoulements multiphasiques (eau, air et huile) en milieux poreux. Il permet également de coupler le transport de masse aux phénomènes de dissolution, d'adsorption, de volatilisation et de biodégradation qui interviennent dans les zones saturées et insaturées du sol.



2.2 Variations des conditions aux limites : facteur d'influence

Après une période de modélisation simulant l'établissement d'un panache stabilisé (sans variations de conditions aux limites), les simulations en régime transitoire s'étendent sur la période du 17 avril 2014 au 30 juin 2015. La pluie, les variations de niveau de nappe et les variations de pression atmosphérique enregistrées sur le site atelier du projet TEMPAIR sont appliquées en conditions aux limites sur cette période (Figure 2).

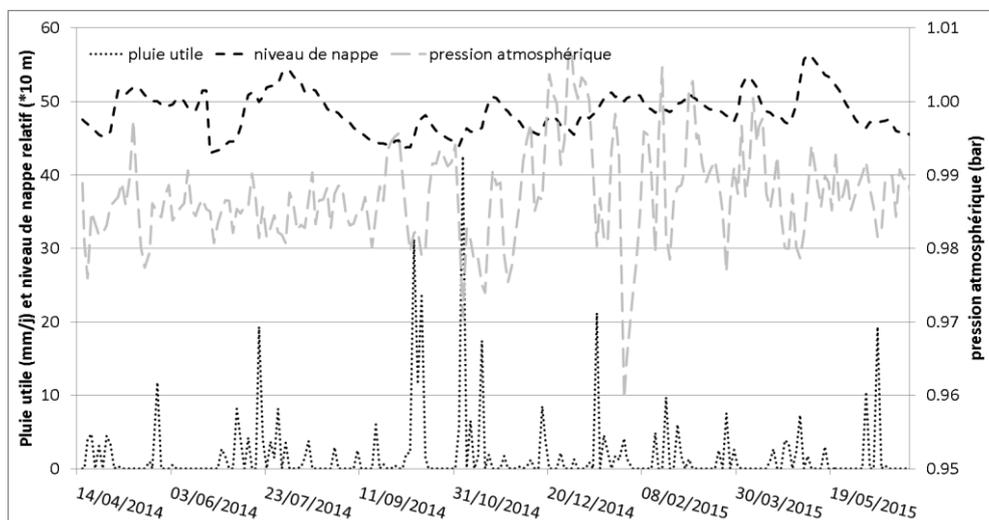


Figure 2 – Variations temporelles des facteurs hydro-météorologiques imposés dans les modélisations

Une analyse des séries temporelles de ces trois facteurs a été réalisée. Les graphiques d'autocorrélation de ces trois facteurs montrent que la pluie peut être considérée comme un phénomène aléatoire tandis que la pression atmosphérique et surtout la nappe présentent des phénomènes plus structurés (Figure 3, à gauche). De plus, les corrélogrammes croisés entre les facteurs ont été réalisés (Figure 3, à droite). Ils expriment la variation du coefficient de corrélation calculé entre deux séries (par exemple le niveau de nappe et la pluie) suivant un pas de temps de plus en plus grand. Il donne des informations sur l'importance des relations des deux séries (relation de causalité, degré de corrélation suivant la période) et permet d'apprécier l'existence d'un éventuel décalage temporel entre celles-ci. Notons que l'on présente ici que la partie droite du corrélogramme croisé. Ces corrélogrammes croisés mettent en évidence que :

- les variations de pression atmosphérique et battement de nappe ne sont pas corrélées ;
- une corrélation négative existe entre la pluie utile et la pression atmosphérique : la pression baisse de manière quasi instantanée avec la pluie ;
- la pluie et les cotes de la nappe sont corrélés positivement moyennant un décalage de 2 jours : la pluie induit une hausse de la nappe dans les deux jours qui suivent.

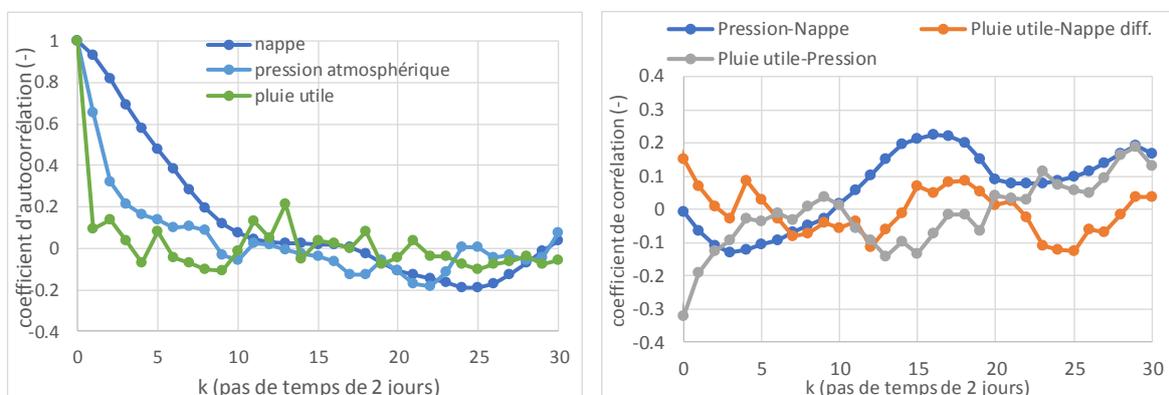


Figure 3 – Analyse des séries temporelles de la pluie, de la pression atmosphérique et des fluctuations de nappe : graphiques d'autocorrélation (à gauche) et corrélogramme croisé (à droite). Nota : la corrélation croisée entre pluie et nappe est réalisée avec un différentiel de 2 jours entre les 2 signaux



2.3 Situations modélisées

Alors qu'il est difficile d'analyser les variations des teneurs dans les gaz du sol au regard des observations et de la modélisation du site atelier dans les projets précédents, il est apparu utile de simuler d'autres situations afin d'approfondir la compréhension des écoulements et des transferts ainsi que d'illustrer la variabilité des concentrations et des flux. Plusieurs situations ont ainsi été modélisées.

- Trois lithologies ont été testées :
 - o lithologie hétérogène composé de 1m de remblais sablo-limoneux puis 2m de limons et 4m de sables dont 2m sont saturés (présence de la nappe), celle-ci correspond à la lithologie rencontrée sur le site atelier du projet TEMPAIR (configuration dite « initiale ») ;
 - o lithologie homogène limons composée uniquement de limons ;
 - o lithologie homogène sables composée uniquement de sables.
 - Des sources de taille et de localisation différentes ont été considérées (Figure 4) :
 - o pour les sources dites « verticales » (d'une extension de 3m en horizontal et de 4 m en vertical, la source est sous forme de PCE pur dont la saturation est de 1% soit au total une masse de 58 kg de PCE), 3 positions ont été simulées :
 - source en limite de dalle (configuration initiale) ;
 - source sous dalle ;
 - source hors dalle (excentrée de 15m vers la gauche par rapport à la configuration initiale) ;
 - o pour les sources dites « horizontales » :
 - source horizontale sous dalle (située à la limite entre les remblais et les limons à 1m de profondeur (20 cm d'épaisseur) et étalée sous toute la longueur de la dalle (80m), la saturation de la phase est de 1%, ce qui correspond à une masse totale de 85 kg de PCE) ;
 - source en nappe (sur toute la largeur du modèle).
 - La nappe a été positionnée à 5m (configuration initiale) ou à 10 m de profondeur.
 - Plusieurs perméabilités de dalle allant de 2.10^{-16} m^2 à 2.10^{-11} m^2 ont été testées. De manière générale, on parle de perméabilité faible lorsque celle-ci est de 2.10^{-16} m^2 et de perméabilité forte lorsqu'elle est de 2.10^{-12} m^2 .
 - Enfin, une mise en dépression de 4 ou 40^3 Pascals a été appliquée au-dessus de la dalle entre le 15 novembre et le 15 mars dans certaines simulations pour étudier l'influence du tirage thermique en hiver.
- Au total une trentaine de simulations ont été réalisées.

³ Une dépression de 40 Pascals n'est pas représentative des dépressions attendues dans les bâtiments (en générale elles sont inférieures à 10 Pascals). Cette simulation est réalisée uniquement dans un but de compréhension du fonctionnement du système (étude de la prépondérance des mécanismes de convection et de diffusion lors du transfert à travers la dalle)



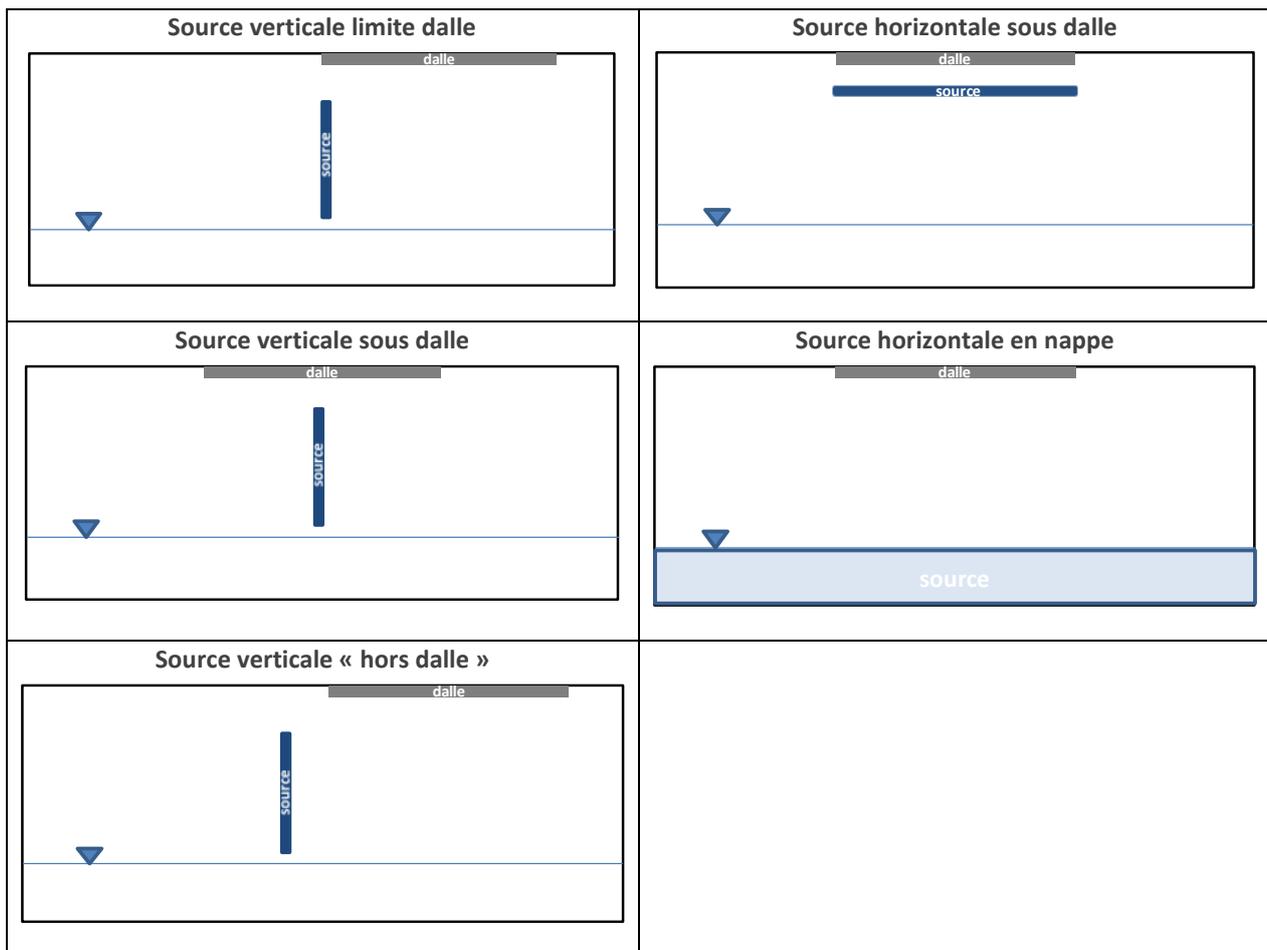


Figure 4 – Position des différentes sources modélisées - schéma de principe (échelles verticale / horizontale non respectées)

3. Fonctionnement global du système

3.1 Temps caractéristiques de stabilisation du panache et durée de la source

Tandis que les gaz du sol sont initialement exempts de pollution dans le modèle, une première phase d'initialisation du modèle est simulée afin d'obtenir un panache de polluant gazeux stabilisé (diffusion pure). Les durées nécessaires à cette stabilisation sont pour une dalle de perméabilité faible et une lithologie hétérogène de 3 ans (à 10m de la source hors dalle) à 10 ans (à 50 mètres de la source sous dalle). Ces durées de stabilisation sont d'autant plus élevées que le milieu présente une saturation en eau élevée. Ainsi pour une lithologie de limons, les temps de stabilisation peuvent être multipliés par 2. Ce constat met en évidence que les retours à l'équilibre après une perturbation du milieu sont relativement longs.

Le volume de source modélisé correspond pour les sources verticales à environ 36 litres de phase organique (NAPL). Une simulation en régime diffusif stationnaire sur une durée de 100 ans a été réalisée afin de voir l'évolution de la zone source à long terme. Elle montre que le volume de source diminue très lentement : il a diminué de 0.7% au bout de 50 ans et de 1.4% au bout de 100 ans. Ainsi, même si ces temps caractéristiques sont surestimés en l'absence de prise en compte des variations hydro-météorologiques, cette simulation met



en évidence que les durées d'émission des sources de phase organique sont longues au regard notamment de la durée de vie des bâtiments⁴.

3.2 Bilan de flux d'eau et de gaz

Sur la période simulée, la pluie utile sur toute la période de simulation (d'environ 14 mois) est de 820 mm soit 98 m³ d'eau entrant dans le modèle au niveau des surfaces non dallées. Ce volume migre verticalement et gagne éventuellement la nappe. L'entrée de pluie dans le milieu induit une chasse des gaz de la zone non saturée vers la surface et l'atmosphère. Les fluctuations de nappe quant à elle sont comprises entre 4.5 et 5.9m de profondeur avec des variations bijournalières en moyenne de 20cm (maximum à 85 cm). Tandis que les battements génèrent des entrées et des sorties d'eau successives (par la base) du modèle au cours de la période simulée, en cumulé, ils correspondent à une entrée d'eau de 20 m³ sur la totalité de la période (dans le cas de la lithologie hétérogène ou homogène sable). Enfin les variations de pression atmosphérique, comprises entre 0.959 et 1.007 bars, provoquent des entrées et sorties d'air successives à la surface du modèle.

Le bilan des flux cumulés intégré sur toute la période de simulation (correspondant à un peu plus de 14 mois d'enregistrement, cf. Figure 2) est présenté dans le **Tableau 1**. De manière générale, la masse d'eau entrante se fait en majorité par la pluie : 40% du volume de pluie entrant est compensé par une sortie d'air (vers la surface), et 60% sort de la zone modélisée par l'aquifère. Le bilan est ainsi équilibré (le gaz est considéré comme faiblement compressible). Notons que ce bilan de flux est spécifique aux conditions hydro-météorologiques de la période modélisée. L'année simulée n'est pas nécessairement représentative d'autres années et d'autres contextes. L'évaluation des tendances sur le long terme nécessiterait de considérer des périodes plus longues (10 ans ou plus).

Conditions aux limites	Volume d'eau et d'air cumulé intégré sur la période de simulation (m3)
Pluie utile	+98
Atmosphère (Intérieur et extérieur confondu)	-34
Aquifère	-64

Tableau 1 – Bilan de flux cumulés sur la période simulée (positif : entrant dans le modèle, négatif : sortant du modèle)

L'évolution du bilan de flux au cours de l'année est présentée sur la Figure 5 (situation où la lithologie est hétérogène). Les facteurs qui génèrent une sortie d'air à la surface sont :

- la hausse de la nappe ;
- la pluie ;
- la baisse de la pression atmosphérique.

A ce stade, il est difficile d'identifier le facteur le plus impactant parmi les trois modélisés. Les flux d'eau générés par les variations des conditions hydro-météorologiques au droit de l'aquifère comme les flux d'air vers la surface réagissent de manière quasi-instantanée avec les variations des trois paramètres d'influence en considérant la lithologie hétérogène (voir chapitre 4 pour les autres lithologies).

⁴ Mentionnons que ces simulations sont réalisées avec un unique polluant : le perchloroéthylène. Tandis que celui-ci ne se dégrade pas en aérobiose (typiquement dans la Zone Non Saturée), d'autres sources de pollution, comme les hydrocarbures, sont susceptibles de se dégrader dans la zone non saturée et ainsi avoir des durées de vie plus courtes que celle estimée ici.



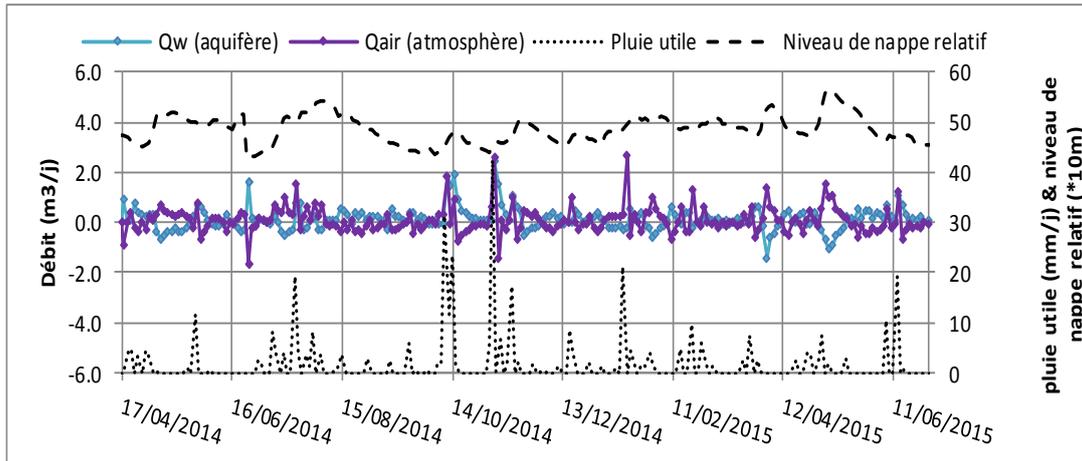


Figure 5 – Evolution des débits (entrant et sortant) au droit des conditions aux limites (cas d'une lithologie hétérogène)

3.3 Mécanismes convectifs et diffusifs de transport à travers la dalle

Le transport de polluants dans la zone non saturée est régi par 2 mécanismes principaux largement décrits dans le guide méthodologique FLUXOBAT (Traverse et al, 2013) :

- en convection, le transport est piloté par le déplacement de gaz qui entraîne les vapeurs de polluants, la convection est liée à la perméabilité du milieu et au gradient de pression ;
- en diffusion, le transport est piloté par les gradients de concentrations de polluants (lorsque les écoulements de gaz sont négligeables), la diffusion est liée en outre à la diffusivité du milieu.

Afin d'identifier le mécanisme majoritaire, le nombre de Péclet, défini comme le rapport du flux convectif sur le flux diffusif, est calculé. Ainsi, lorsque le transport est majoritairement convectif, le nombre de Péclet est supérieur à 1 et lorsque la diffusion prédomine, il est inférieur à 1.

La Figure 6 présente l'évolution du nombre de Péclet moyen à travers la dalle pour différentes lithologies et différentes perméabilités de dalle. De manière générale, dans les simulations réalisées, le transport à travers la dalle est majoritairement diffusif. La convection peut être ponctuellement importante lorsque la lithologie est limoneuse (peu perméable) ou lorsque la perméabilité de dalle est faible. Néanmoins les nombres de Péclet restent inférieurs à 3 dans toutes les situations testées. En pratique, la convection peut ponctuellement devenir majoritaire lorsque le rapport perméabilité de dalle / perméabilité des sols sous-jacents est inférieur à 0,001.

Dans les simulations réalisées pour les lithologies limoneuses (perméabilité de 2.10^{-13} m^2) ou de perméabilité de dalle faible (2.10^{-16} m^2), les augmentations ponctuelles du nombre de Péclet ne dépassent pas quelques jours. Elles correspondent à des variations abruptes de conditions hydro-météorologiques : lorsque la nappe varie de plus de 20 cm en 2 jours, pour des pluies utiles supérieures à 20 mm/j ou lorsque la pression atmosphérique varie de plusieurs dizaines de millibars en quelques jours.



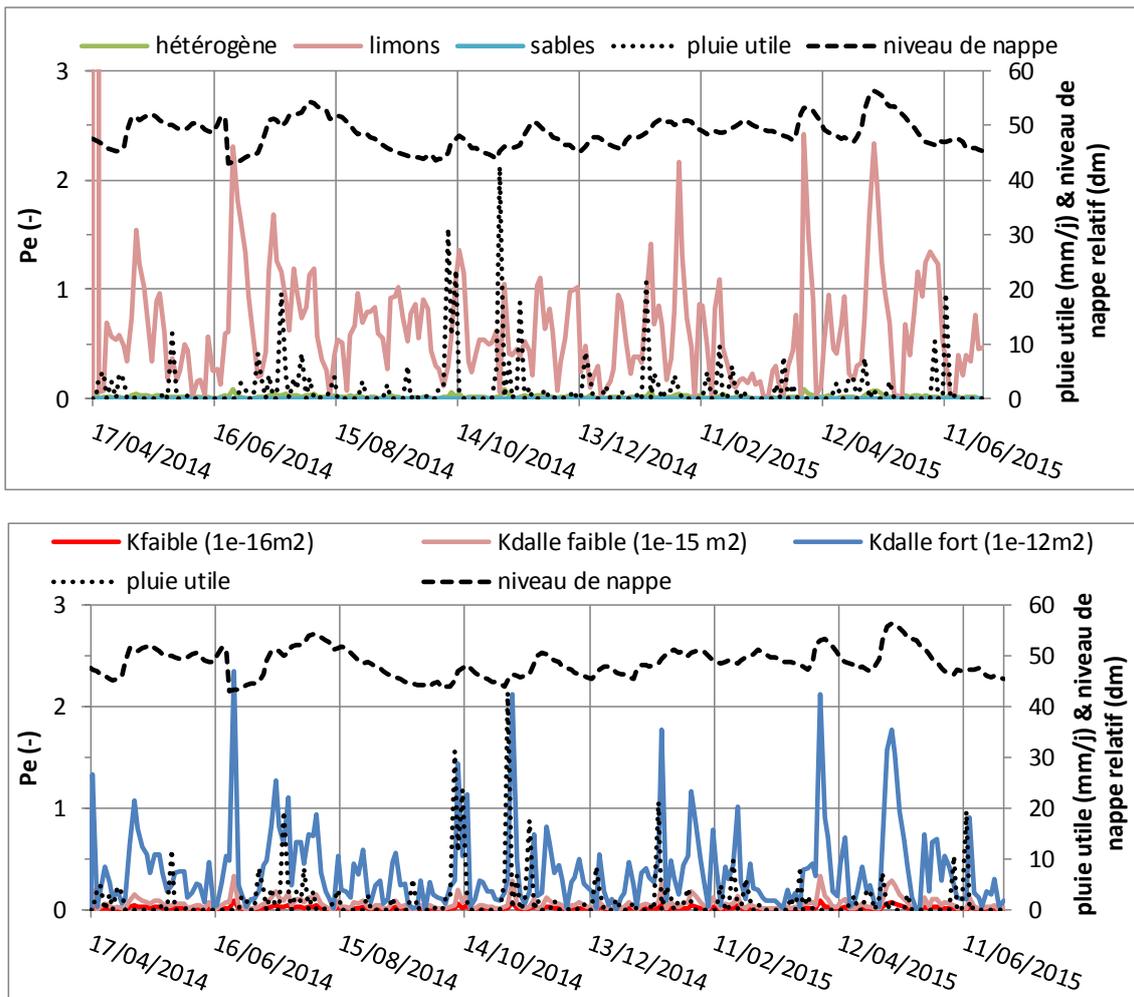


Figure 6 – Evolution des nombres de Péclet pour différentes lithologies (en haut, cas d'une perméabilité de dalle faible) et pour différentes perméabilités de dalle (en bas, cas d'une lithologie hétérogène)

3.4 Hétérogénéités des débits d'air et des débits massiques à travers la dalle

Lorsque la dalle est faiblement perméable, le flux d'air passant à travers la dalle (par unité de surface) correspond en moyenne à 2% du débit transitant à la surface pour une différence de perméabilité dalle / sol⁵ de 5 ordres de grandeur (Tableau 2). Il peut atteindre 28% lorsque la lithologie est limoneuse (différence de perméabilité dalle / sol⁶ de 3 ordres de grandeur). Par contre, lorsque la dalle est dégradée, la même proportion de débit passe vers l'atmosphère au droit des surfaces non recouvertes qu'à travers la dalle (y compris lorsque la perméabilité de dalle est de 1 à 2 ordres de grandeur inférieure à celle du sol⁵).

⁵ Il s'agit des sols immédiatement sous dalle et des sols proches de la surface avec l'atmosphère.

⁶ Il s'agit des sols immédiatement sous dalle et des sols proches de la surface avec l'atmosphère.



	Débit d'air à travers la dalle (moyenne sur la période en $m^3/m^2/j$)	Débit d'air vers l'atmosphère (moyenne sur la période en $m^3/m^2/j$)
Influence de la lithologie (perméabilité de dalle faible à $2.10^{-16} m^2$)		
Hétérogène (remblais, limons, sables)	2.10^{-5}	7.10^{-4}
limons	$-1.5.10^{-4}$	-5.10^{-4}
sables	10^{-7}	-4.10^{-6}
Influence de la perméabilité de dalle (lithologie hétérogène)		
Perméabilité de dalle faible ($2.10^{-16} m^2$)	2.10^{-5}	7.10^{-4}
Perméabilité de dalle forte ($2.10^{-12} m^2$)	4.10^{-4}	4.10^{-4}

Tableau 2 – Débit d'air moyen à travers la dalle et vers l'atmosphère

A la surface du modèle, les flux d'air qui transitent sont inégalement répartis le long du linéaire (Figure 7). Lors d'un événement ponctuel tel qu'une hausse de la nappe, le débit d'air sortant à la surface est le plus fort aux abords de la dalle sur une distance inférieure à 5 m. En effet, la hausse de la nappe provoque une chasse de l'air de la zone non saturée vers la surface, l'air sous dalle proche des limites de celle-ci aura alors tendance à sortir dans la zone non dallée aux abords de la limite.

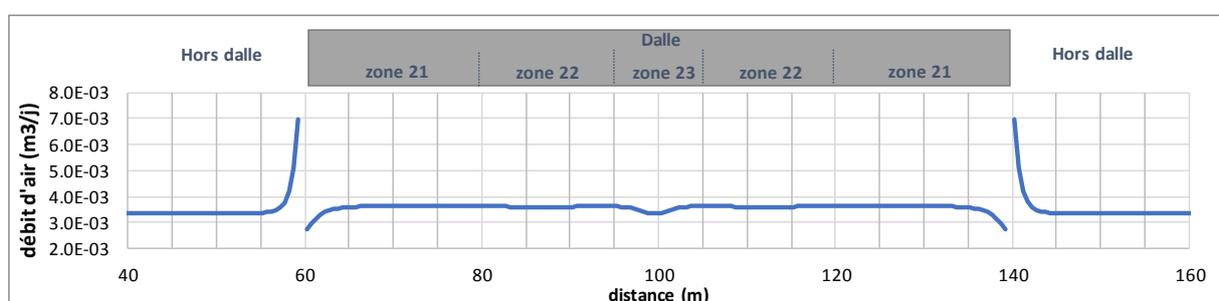


Figure 7 – Débits le long de la dalle juste après une hausse du niveau de nappe le 3 avril 2015 – Lithologie hétérogène & perméabilité de dalle forte ($2.10^{-12} m^2$)

Concernant la répartition des flux de polluant vers l'air intérieur et l'atmosphère, celle-ci dépend fortement de la position de la source et de la perméabilité de la dalle. A titre d'exemple, les Figure 8 et Figure 9 présentent la répartition de celui-ci sur tout le domaine et plus particulièrement au droit de la dalle dans la configuration où la source est verticale sous dalle (ici la perméabilité des sols sous dalle et à l'interface avec l'atmosphère est de $2.10^{-11} m^2$ et celle de la dalle est de $2.10^{-12} m^2$). Elles mettent en évidence qu'après un épisode de remontée de nappe conduisant à une surpression inférieure à 0.2 pascal sous dalle et donc un transport essentiellement diffusif :

- l'essentiel du flux de polluant vers la surface se fait au droit de la dalle ;
- la majorité du polluant transite par le centre de la dalle au droit de la source ;
- le flux massique décroît fortement en s'écartant de la source : à 10 m il est d'un ordre de grandeur en dessous de celui de la zone centrale et plus de 4 ordres de grandeur dans la zone non couverte.

Ainsi, la variabilité spatiale des flux pris ponctuellement (en un point donné) est très forte (ici variation d'un ordre de grandeur en se déplaçant d'un mètre).



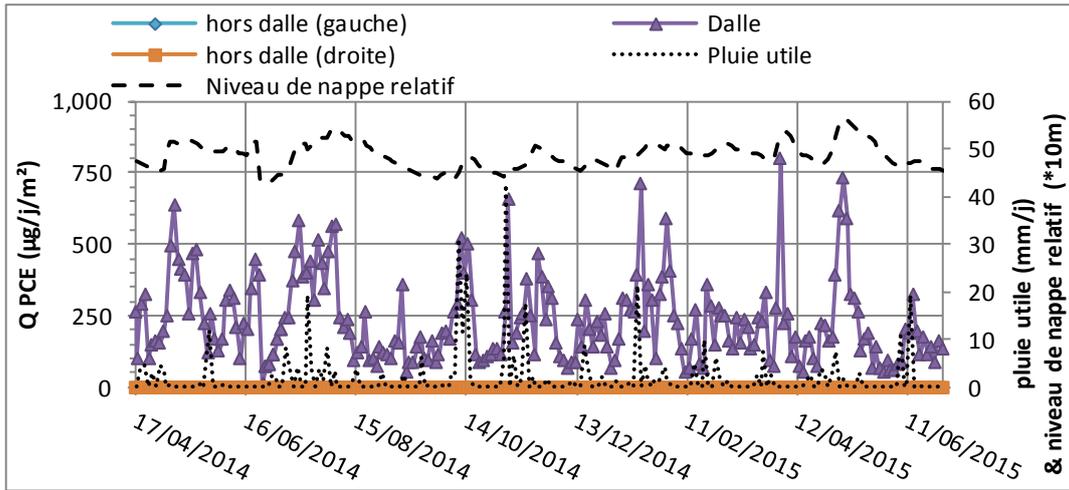


Figure 8 – Evolution des débits massiques de PCE vers la surface – Lithologie hétérogène & perméabilité de dalle forte (2.10^{-12} m^2)

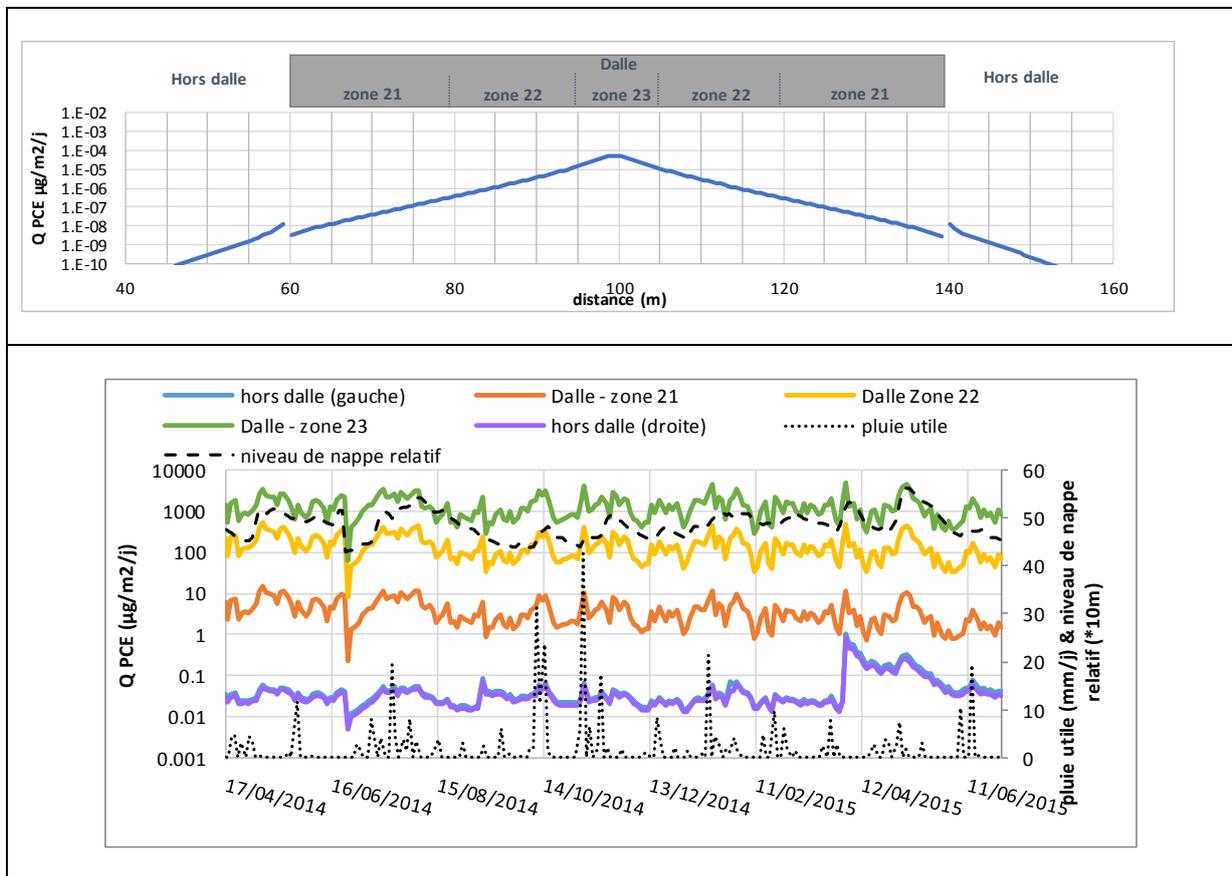


Figure 9 – Flux massique de PCE le long du linéaire de la dalle juste après une hausse du niveau de nappe le 3 avril 2015 (en haut) et évolution des flux par zone (en bas) – Source verticale centrée sous dalle, lithologie hétérogène & perméabilité de dalle forte



4. Comparaison des situations modélisées

4.1 Variabilité des concentrations dans les gaz du sol

4.1.1 Concentrations ponctuelles

Les variations de concentrations en PCE dans les gaz du sol sont étudiées en 3 points d'observation : hors dalle à 10m de sa limite, sous dalle à 10m de la limite et sous dalle à 30 m quasiment au centre de la dalle (voir les schémas de la Figure 10 pour leur position). Pour chaque localisation, 4 profondeurs sont analysées : à 50 cm, à 1.1 m, à 2.9 m et à 3.5 m de profondeur (pour la lithologie hétérogène, cela correspond aux remblais, au haut des limons, au bas des limons et dans les sables). Les évolutions des concentrations sont présentées pour quelques situations sur la Figure 10.

Les concentrations dans les gaz du sol et leurs variations avec les facteurs hydrométéorologiques dépendent des positions relatives de la source et de la dalle ainsi que de la position du point d'observation. La Figure 10 met en évidence que les niveaux moyens de concentrations sur la période sont très différents suivants la position de la source par rapport à la dalle, par exemple au même point d'observation O2 (à 10m de la limite de la dalle sous celle-ci), les teneurs sont proche de 500 mg/m³ lorsque la source est en limite de dalle et d'environ 50 mg/m³ lorsque la source est décalée de 15m vers la gauche (« source verticale hors dalle »).

Par ailleurs, les tendances d'évolutions des concentrations avec les paramètres hydro-météorologiques dépendent fortement de la configuration. Pour s'en convaincre, portons l'attention sur l'effet de la baisse du niveau de la nappe de juin 2014 (voir les directions d'écoulement résultantes sur les schémas de la Figure 10), on constate que l'effet peut être très différent en fonction de la position relative de la source et de la dalle mais également de l'endroit où on se place. Lorsque la source est située en limite de dalle (source verticale, cf. deuxième ligne de la Figure 10), cette baisse engendre une baisse des concentrations hors dalle à toutes les profondeurs (sur le point d'observation O1) en raison de l'arrivée d'air propre depuis la surface. Par contre, elle génère une hausse des concentrations sous dalle en profondeur en lien avec l'arrivée d'air qui s'est chargé en polluant en traversant la source. Lorsque la source est située plus loin de la dalle (première ligne de la Figure 10), la baisse du niveau de nappe provoque l'arrivée d'air propre sur le point d'observation O1 (hors dalle proche de la limite) à faible profondeur (dans les remblais et les limons haut) et une arrivée d'air qui s'est chargé en polluant en traversant la source en profondeur (dans les sables et les limons bas). La variation des concentrations est ainsi inversée en fonction de la profondeur d'observation dans cette configuration.

Vis-à-vis des différentes situations modélisées, la plus forte variabilité temporelle des concentrations dans les gaz du sol est observée lorsque la lithologie est hétérogène et la perméabilité de dalle est faible. Elle peut atteindre 3 ordre de grandeur au maximum (avec une source sous dalle en regardant sur le point d'observation O1 par exemple). L'influence de la lithologie est de ce point de vue primordiale : les variations de concentrations peuvent atteindre 2 à 3 ordres de grandeur avec une lithologie hétérogène tandis qu'elles sont inférieures à un facteur 4 si la lithologie est homogène et limoneuse (avec une perméabilité de dalle faible et au même point d'observation). La perméabilité de dalle est tout aussi importante, en lithologie hétérogène : les variations passent de 3 ordres de grandeur avec une dalle de bonne perméabilité à moins d'un ordre de grandeur avec une dalle dégradée. Cette forte variabilité est observée autant en surface (dans les remblais) qu'en profondeur (dans les sables).

La dynamique des variations des débits aérauliques (en totalité, sans distinction hors dalle / sous dalle) et de concentrations dans les gaz du sol sont similaires à celles des facteurs d'influence pour les lithologies hétérogène et homogène sables, dans ces contextes le système réagit de manière rapide (2 à 4 jours). A l'inverse pour une lithologie homogène avec des limons, on observe une inertie du système, ceci en raison de la plus faible perméabilité du milieu. Les variations des concentrations sont moins immédiates dans ce cas (5 à 10 jours) et l'amplitude des variations est plus faible (inférieure à un ordre de grandeur).

Par ailleurs, une accumulation lente de polluant sous dalle se produit lorsque la dalle est faiblement perméable et la source située en latéral par rapport à la dalle (source en limite dalle ou hors dalle). A l'inverse,



le panache sous dalle s'appauvrit progressivement lorsque la source est située sous dalle (source verticale) et que celle-ci est dégradée : après un mouvement de chasse de polluant provoqués par les variations des facteurs hydrométéorologiques, le panache n'a pas le temps de se re-stabiliser. Ces phénomènes sont à relier aux temps de stabilisation qui peuvent être longs (cf. chapitre 3.1).

Concernant l'influence relative des 3 facteurs d'influence simulés, le facteur qui semble influencer les variations de concentrations de manière majoritaire est la fluctuation du niveau de nappe dans toutes les simulations réalisées y compris lorsque la nappe est plus profonde. L'importance relative des 3 facteurs d'influence a été étudiée de manière détaillée par l'analyse des séries temporelles des concentrations moyennes et des flux (cf. chapitre 4.3).



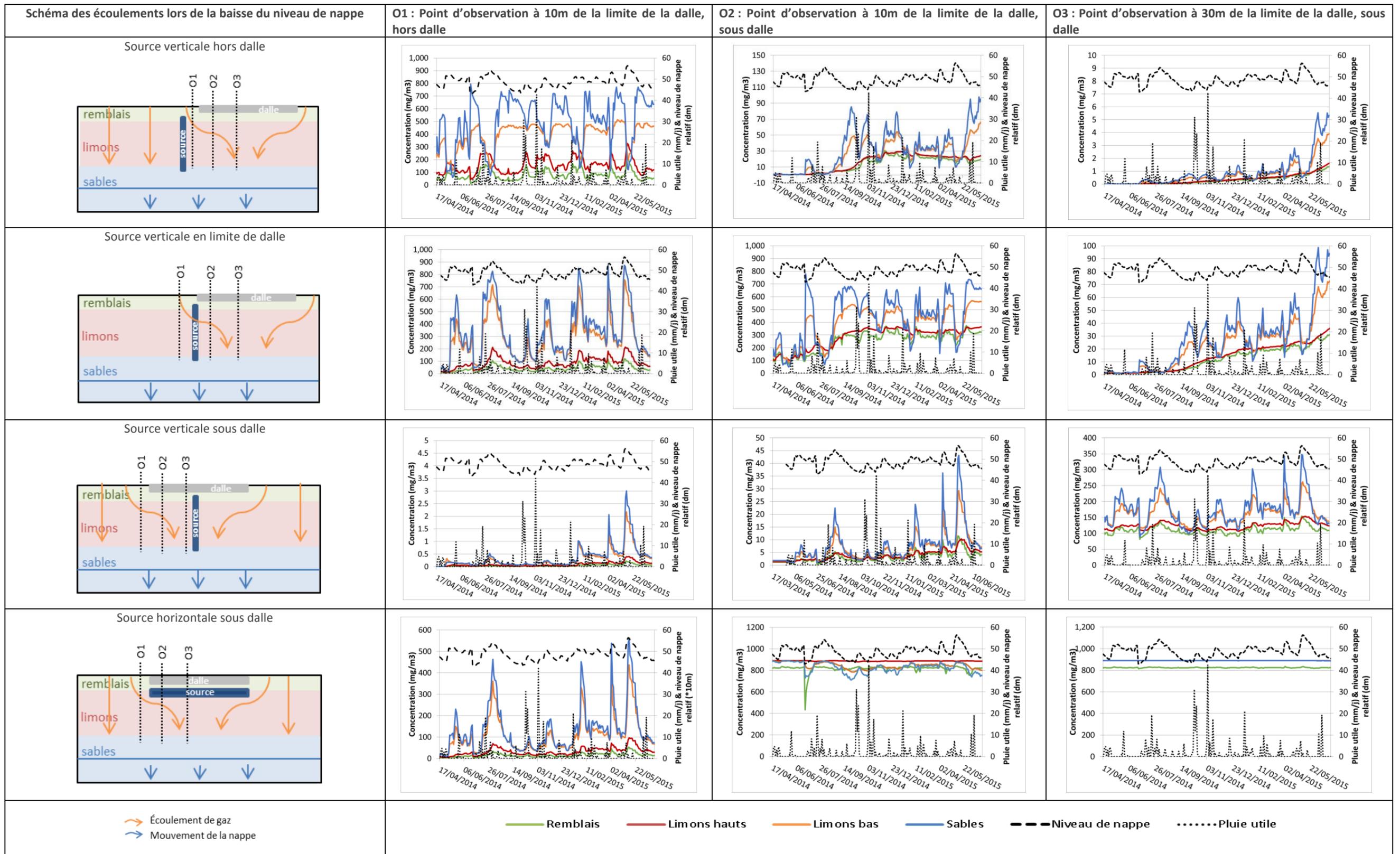


Figure 10 – Evolution des concentrations en différentes localisations pour différentes positions de source (lithologie hétérogène, perméabilité de dalle faible, nappe à 5 m)



4.1.2 Concentrations moyennes sous dalle

La « concentration moyenne sous dalle » est calculée dans toutes les configurations, elle correspond de la moyenne des concentrations à 5 cm sous la dalle (maille immédiate sous les mailles de dalle) et sur toute la longueur de dalle. Les évolutions temporelles de concentrations moyennes sous dalle sont présentées sur la figure ci-dessous pour quelques simulations.

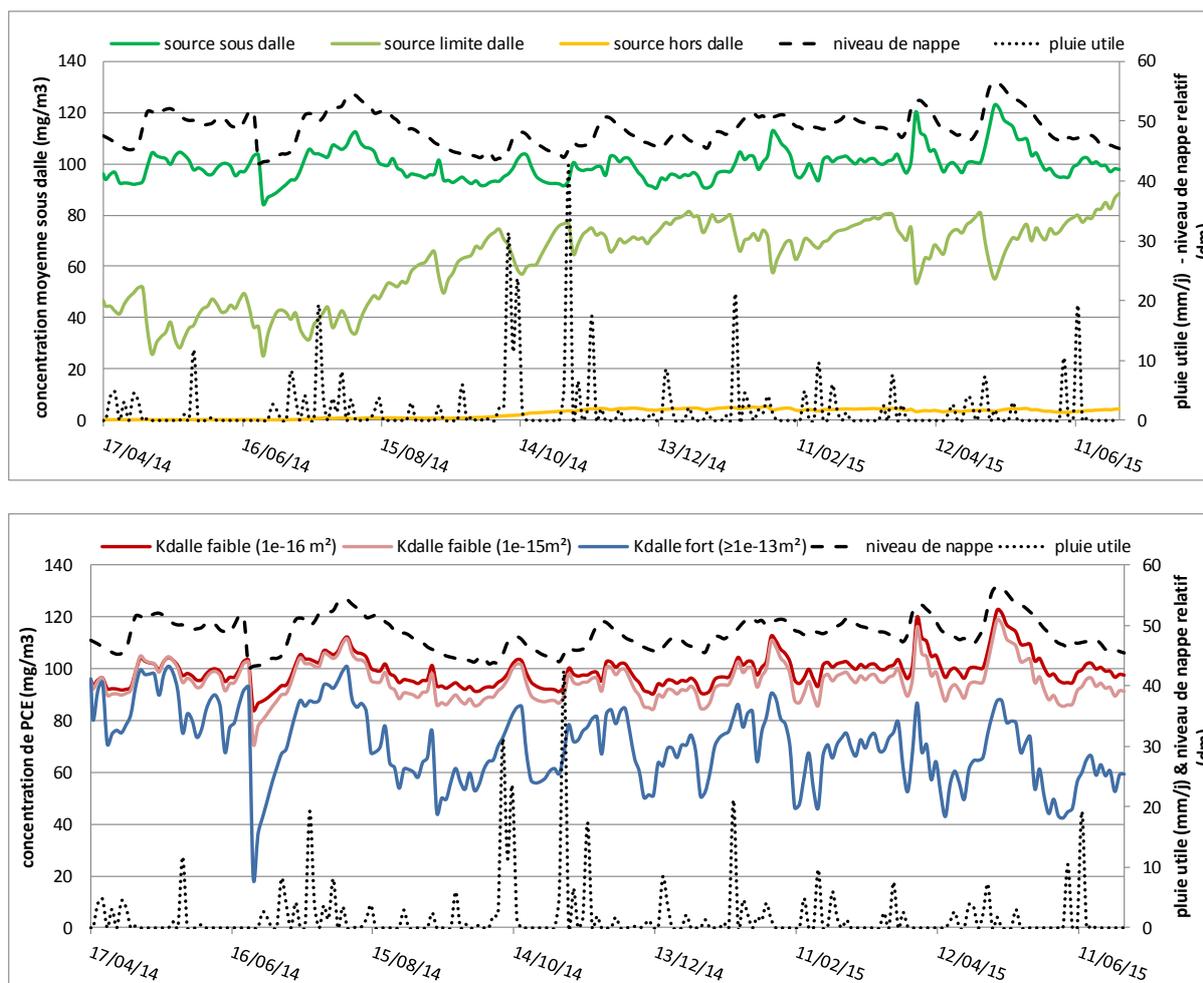


Figure 11 – Evolution des concentrations moyennes sous dalle pour différentes positions de source (en haut - lithologie hétérogène, perméabilité de dalle faible) et pour différentes perméabilités de dalle (en bas - lithologie hétérogène, source sous dalle)

Les niveaux de concentrations moyennes peuvent être très différents selon la position de la source (en moyenne sur la période, la concentration est comprise entre 40 et 70 mg/m³ lorsque la source est située à la limite de la dalle et entre 0.2 et 4 mg/m³ lorsqu'elle est décalée de 15 m hors dalle, cf. **Tableau 3**). Les niveaux de concentrations moyennes sous dalle sont similaires quelle que soit la lithologie. Par ailleurs, plus la perméabilité de dalle est forte, plus la concentration moyenne sous dalle est atténuée. Ces modifications restent néanmoins modestes : dans le cas d'une source verticale sous dalle, la concentration moyennée sur toute la période passe de 100 mg/m³ (perméabilité faible, 2.10⁻¹⁶ m²) à 60-80 mg/m³ (perméabilité forte, 2.10⁻¹² m²) (cf. **Tableau 3**).



	Moyenne sur toute la période (mg/m ³)	Facteur de variabilité maximum
Influence de la position de source (perméabilité de dalle faible)		
Source verticale hors dalle	0.2 à 4 ⁷	50
Source verticale limite dalle	40 à 70 ⁷	3
Source verticale sous dalle	100	1.5
Source horizontale sous dalle	730	1.5
Influence de la perméabilité de dalle (source verticale centrée sous dalle)		
Perméabilité de dalle faible	100	1.5
Perméabilité de dalle forte	60 à 80 ⁷	5

Tableau 3 – Moyennes temporelles et variabilités des concentrations moyenne sous dalle pour une lithologie hétérogène

Les variabilités temporelles des concentrations moyennes sous dalle sont globalement atténuées par rapport à la variabilité des concentrations ponctuelles dans les gaz du sol. Elle atteint un facteur 50 au maximum (dans le cas d'une source verticale hors dalle) contre 2 à 3 ordres de grandeur pour les concentrations ponctuelles dans les gaz du sol. L'analyse des facteurs de variations présentées dans le **Tableau 3** mettent en évidence que :

- La variabilité est faible lorsque la source est sous dalle ;
- Plus la source est décalée par rapport au centre de la dalle et plus la variabilité est forte. Ainsi, une source décalée de 15m de limite de dalle (hors dalle) conduit à une variabilité de concentration bien plus importante que celle issue d'une source positionnée à la limite de la dalle (facteur de variabilité de 50 lorsque la source est éloignée contre un facteur 3 lorsqu'elle est à la limite de dalle) ;
- La variabilité est plus importante lorsque la dalle est dégradée (à partir d'une perméabilité de 2.10^{-14} m² dans les configurations modélisées), les concentrations sous dalle étant plus influencées par les facteurs hydro-météorologiques dans ce cas.

Les phénomènes d'accumulation ou d'appauvrissement lents identifiés sur les concentrations ponctuelles sont également visibles sur les concentrations moyennes, là encore en lien avec la lenteur de la stabilisation du panache (cf. chapitre 3.1).

Enfin, les battements de nappe semblent être le facteur majeur de variabilité par rapport aux autres facteurs. Cette influence est approfondie dans le chapitre 4.3.

4.2 Variabilité des transferts vers la surface

4.2.1 Flux de polluant à travers la dalle

Dans une logique d'évaluation des transferts vers l'air intérieur du bâtiment, les résultats sont également présentés sous forme de flux massiques de polluant moyen traversant la dalle (Figure 12).

A l'image des concentrations moyennes et concernant les niveaux moyens de flux sur la période :

- ils sont très variables en fonction de la position de la source : inférieur à 10 µg/m²/j en moyenne sur la période lorsque la source est située hors dalle, ils sont compris entre 100 et 200 µg/m²/j lorsque la source est en limite de dalle (cf. **Tableau 4**) ;
- ils sont similaires quelle que soit la lithologie ;
- la perméabilité de dalle n'a qu'une faible influence sur les niveaux de flux moyennés sur la période (cf. **Tableau 4**).

Ces 2 deux derniers points s'expliquent par le caractère diffusif du transport (cf. chapitre 3.3) : la diffusion est similaire dans des lithologies dont la saturation est proche et est indépendante de la perméabilité des milieux.

⁷ la moyenne temporelle est faite sur plusieurs mois (3 à 6 mois), le minimum et le maximum de ces moyennes « glissantes » sont présentés ici pour prendre en compte les évolutions lentes



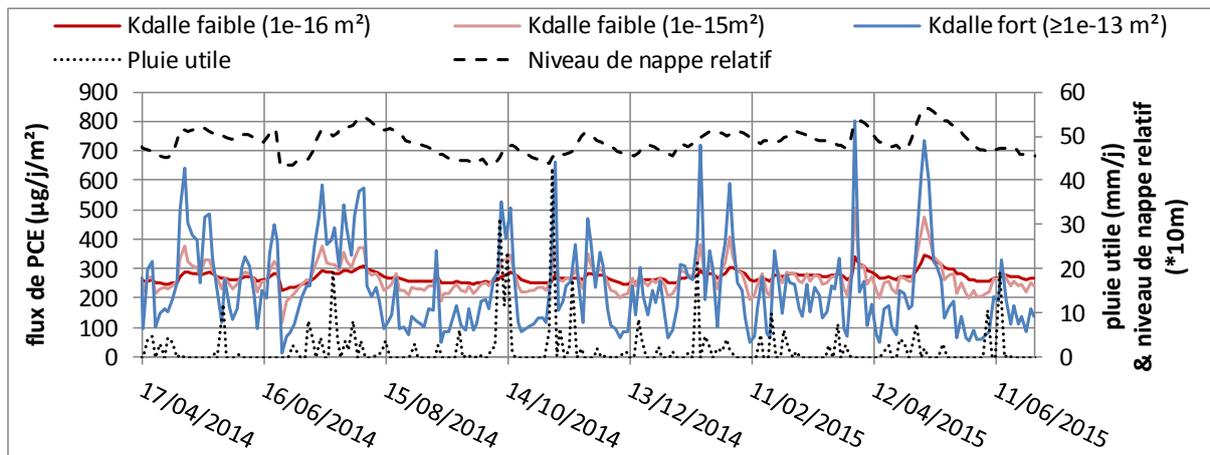
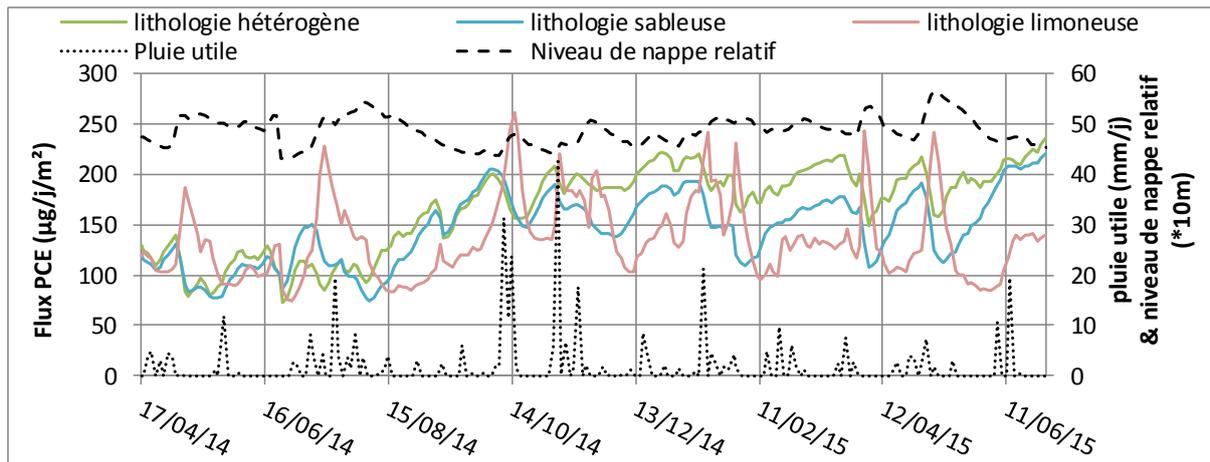


Figure 12 – Evolution des flux moyen à travers la dalle pour différentes lithologies (en haut, source en limite de dalle & perméabilité de dalle faible) et pour différentes perméabilités de dalle (en bas, lithologie hétérogène & source sous dalle)

	Moyenne sur toute la période (µg/m²/j)	Facteur de variabilité maximum
Influence de la position de source (perméabilité de dalle faible)		
Source verticale hors dalle	0.6 à 10 ⁸	8
Source verticale limite dalle	110 à 190 ⁸	2
Source verticale sous dalle	270	1.5
Source horizontale sous dalle	1980	1.5
Influence de la perméabilité de dalle (source verticale centrée sous dalle)		
Perméabilité de dalle faible	270	1.5
Perméabilité de dalle forte	230	70

Tableau 4 – Moyennes temporelles et variabilités des flux massiques à travers la dalle (les valeurs sont données pour une lithologie hétérogène)

Comme les concentrations moyennes sous dalle, la variabilité temporelle des flux est globalement atténuée par rapport à la variabilité des concentrations ponctuelles dans les gaz du sol. Elle atteint un facteur 70 au maximum (cas d'une source verticale centrée sous dalle et une perméabilité forte, cf. **Tableau 4**) contre 2 à 3 ordres de grandeur pour les concentrations ponctuelles dans les gaz du sol. De plus, l'analyse de la variabilité des flux appelle les commentaires suivants :

- la variabilité la plus grande est observée lorsque la perméabilité de dalle est forte (facteur de variation de 70 avec une dalle dégradée contre 1.5 pour une dalle de perméabilité faible). Cela est à relier au

⁸ La moyenne temporelle est faite sur plusieurs mois (3 à 6 mois), le minimum et le maximum de ces moyennes « glissantes » sont présentés ici pour prendre en compte les évolutions lentes



régime de transport dans cette configuration : la convection prédomine ponctuellement lors des événements majeurs hydro-météorologiques (cf. chapitre 3.3) et génère des fortes variations de flux à travers la dalle ;

- la variabilité des flux est plus importante avec une lithologie de type limons (d'un facteur 10 au maximum) qu'avec les autres lithologies (facteur inférieur à 2), ceci en lien également avec des « pics » ponctuels de transport convectif dans ce cas (cf. chapitre 3.3) ;
- les phénomènes d'accumulation ou d'appauvrissement lents du panache sous dalle évoqués plus haut (chapitre 4.1.1 et 4.1.2) sont visibles également sur l'évolution des flux à travers la dalle ;
- enfin, les battements de nappe semblent être le facteur majeur de variabilité par rapport aux autres facteurs sur les flux à travers dalle. Cette influence est approfondie dans le chapitre 4.3.

4.2.2 Flux de polluant vers l'atmosphère

Concernant les flux moyens vers l'atmosphère, ils sont présentés, pour quelques situations, sur la Figure 13.

Comme les concentrations moyennes et les flux, leur niveau dépend entre autres de la position de la source (Tableau 5). Leurs variabilités est forte dans toutes les situations testées (de 1 à 3 ordre de grandeurs). En comparaison aux concentrations et aux flux à travers la dalle, le flux de polluant vers l'atmosphère est le paramètre le plus influencé par les facteurs hydro-météorologiques.

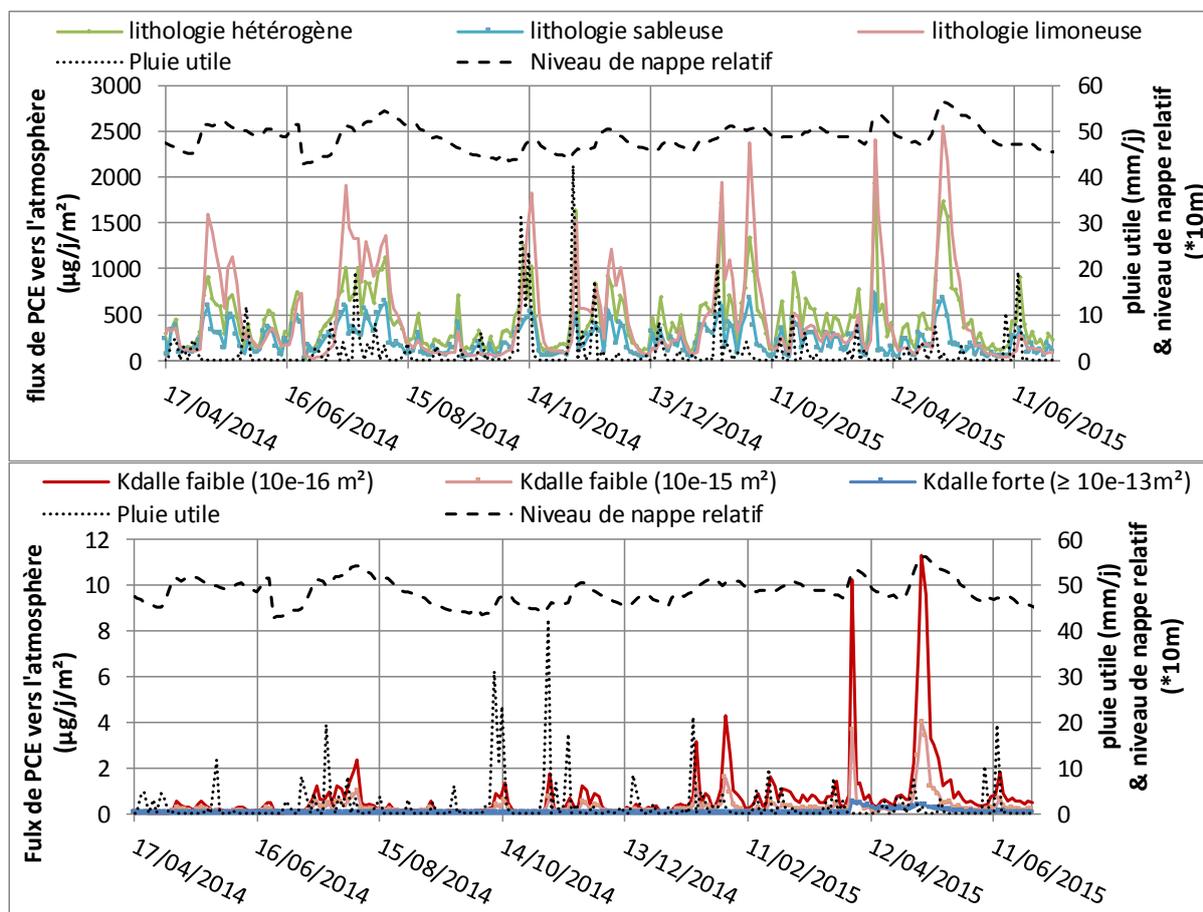


Figure 13 – Evolution des flux moyen vers l'atmosphère pour différentes lithologies (en haut, source en limite de dalle & perméabilité de dalle faible) et pour différentes perméabilités de dalle (en bas, lithologie hétérogène & source sous dalle)



	Moyenne sur toute la période ($\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{j}$)	Facteur de variabilité maximum
Influence de la position de source (lithologie hétérogène, perméabilité de dalle faible)		
Source verticale hors dalle	230	20
Source verticale limite dalle	430	140
Source verticale sous dalle	0.7	1000
Source horizontale sous dalle	480	300
Influence de la perméabilité de dalle (lithologie hétérogène, source verticale centrée sous dalle)		
Perméabilité de dalle faible	0.7	1100
Perméabilité de dalle forte	0.05	125
Influence de la lithologie (perméabilité de dalle forte, source en limite de dalle)		
Lithologie hétérogène	435	140
Lithologie limoneuse	450	90
Lithologie sableuse	220	45

Tableau 5 – Moyennes temporelles et variabilités des flux massiques vers l’atmosphère)

4.3 Importance relative des facteurs d’influence

Les effets des facteurs d’influence (pluie, niveau de nappe et pression atmosphérique) sont difficiles à analyser du fait de leurs effets couplés. Afin de distinguer leur influence relative, l’analyse des séries temporelles des concentrations moyennes sous dalle et des flux (vers l’intérieur et vers l’extérieur) ont été réalisées sur les situations suivantes :

- source horizontale sous dalle avec lithologie hétérogène, perméabilité de dalle faible et nappe à 5 m : cette situation est choisie car il semble que l’influence de la pluie et des variations de pression atmosphérique est plus visible sur les chroniques de concentrations et de flux moyens que dans les autres situations ;
- source verticale centrée sous dalle avec lithologie hétérogène, perméabilité de dalle forte et nappe à 10 m : cette situation est choisie afin de préciser si l’influence des battements de nappe est similaire lorsque celle-ci est plus ou moins profonde ;
- source verticale en limite de dalle avec lithologie limons, perméabilité de dalle faible et nappe à 5m : ici on cherche à préciser le phénomène d’inertie identifié dans cette lithologie.

Les corrélogrammes croisés⁹ des concentrations et flux avec les facteurs d’influence sont présentés en Figure 14 pour une situation (où la source est horizontale sous dalle, la lithologie hétérogène, la perméabilité de dalle forte et la nappe à 5m). L’analyse en séries temporelles appelle les commentaires suivants :

- l’effet des fluctuations de la nappe sur la concentration moyenne et les flux est positif, immédiat et significatif (coefficient de corrélation entre 0.4 et 0.6) ;
- l’effet de la pluie est également visible. La corrélation est toujours positive mais la relation de cause à effet paraît légèrement plus faible que celle de la nappe (coefficient de corrélation de 0.4 à 0.5). Elle est décalée d’un pas de temps (2 jours) ;
- l’effet de la pression atmosphérique est également visible avec un sens de corrélation opposé (lorsque la pression augmente les signaux diminuent et inversement), la corrélation est moindre que pour les deux autres et elle est décalée d’un pas de temps (2 jours) ;
- avec une nappe plus profonde, les corrélations sont similaires, l’influence relative de la nappe et de la pluie ne sont pas modifiées ;

⁹ Le corrélogramme croisé exprime la variation du coefficient de corrélation calculé entre deux séries (par exemple le niveau de nappe et les flux massiques vers l’air intérieur) suivant un pas de temps de plus en plus grand. Il donne des informations sur l’importance des relations des deux séries (relation de causalité, degré de corrélation suivant la période) et permet d’apprécier l’existence d’un éventuel décalage temporel entre celles-ci. Notons que l’on présente ici que la partie droite du corrélogramme croisé.



- L'inertie des signaux dans les limons est visible sur les fonctions d'autocorrélation de la concentration et des flux. Les corrélations croisées avec les facteurs hydro-météorologiques sont néanmoins similaires aux cas avec d'autres lithologies.

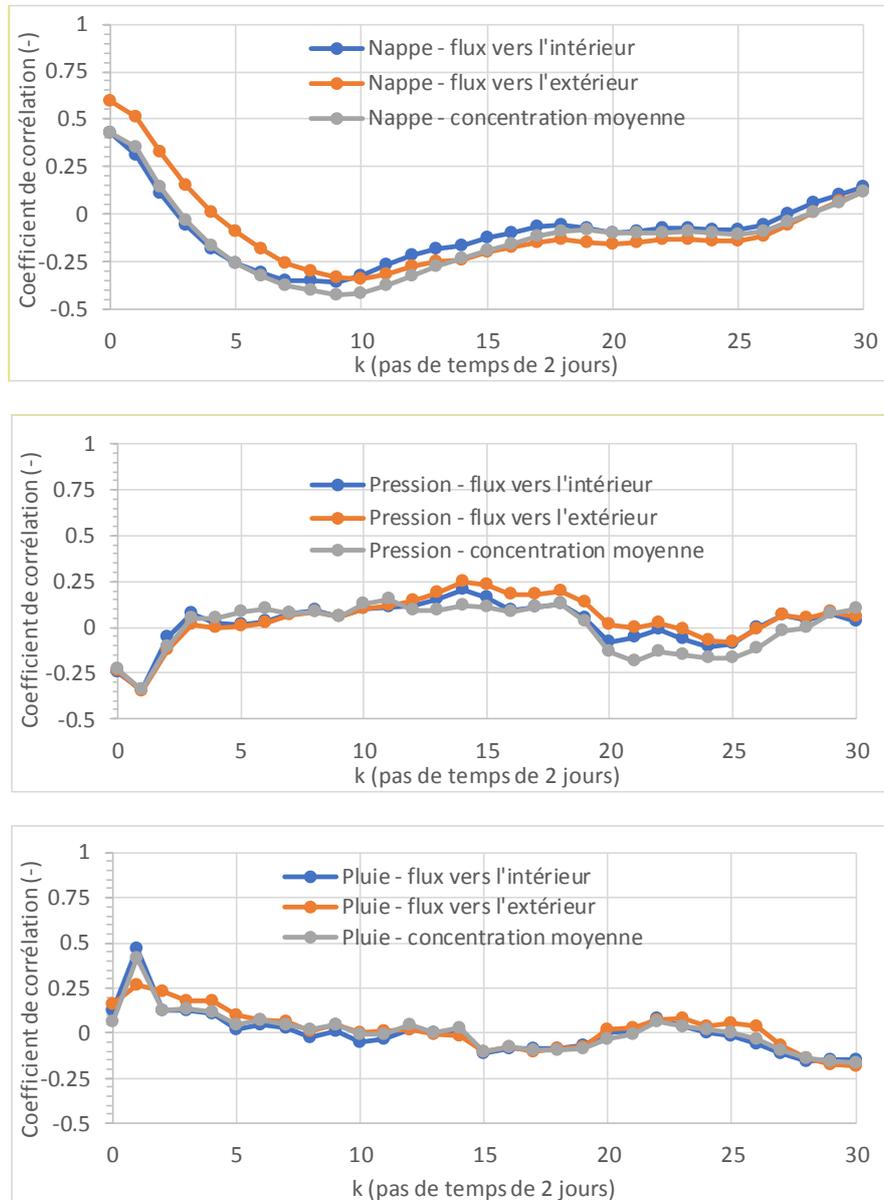


Figure 14 – Corrélogrammes croisés des concentrations moyennes et des flux avec les facteurs d'influence modélisés (situation où la source est horizontale sous dalle, la lithologie est hétérogène, la perméabilité de dalle est forte et la nappe est à 5m)

4.4 Influence du tirage thermique

L'influence du tirage thermique a été modélisé par une mise en dépression de l'espace intérieur (au-dessus de la dalle) de 4 Pascals dans les deux configurations de source sous dalle (horizontale et verticale) et avec une perméabilité de dalle forte en lithologie hétérogène. Ces deux configurations ont été choisies car les échanges gaz du sol / air intérieur sont les plus importants en comparaison aux autres configurations testées. Les flux moyen sont présentés sur la Figure 15.



	Débit d'air à travers la dalle (moyenne sur la période en $m^3/m^2/j$)	Débit d'air vers l'atmosphère (moyenne sur la période en $m^3/m^2/j$)
Hors de la période de chauffe	4.10^{-4}	4.10^{-4}
Pendant la période de chauffe	4.10^{-3}	-2.10^{-3}

Tableau 6 – Débit d'air moyen à travers la dalle et vers l'atmosphère hors et pendant la période de chauffe (cas de la lithologie hétérogène et perméabilité de dalle forte)

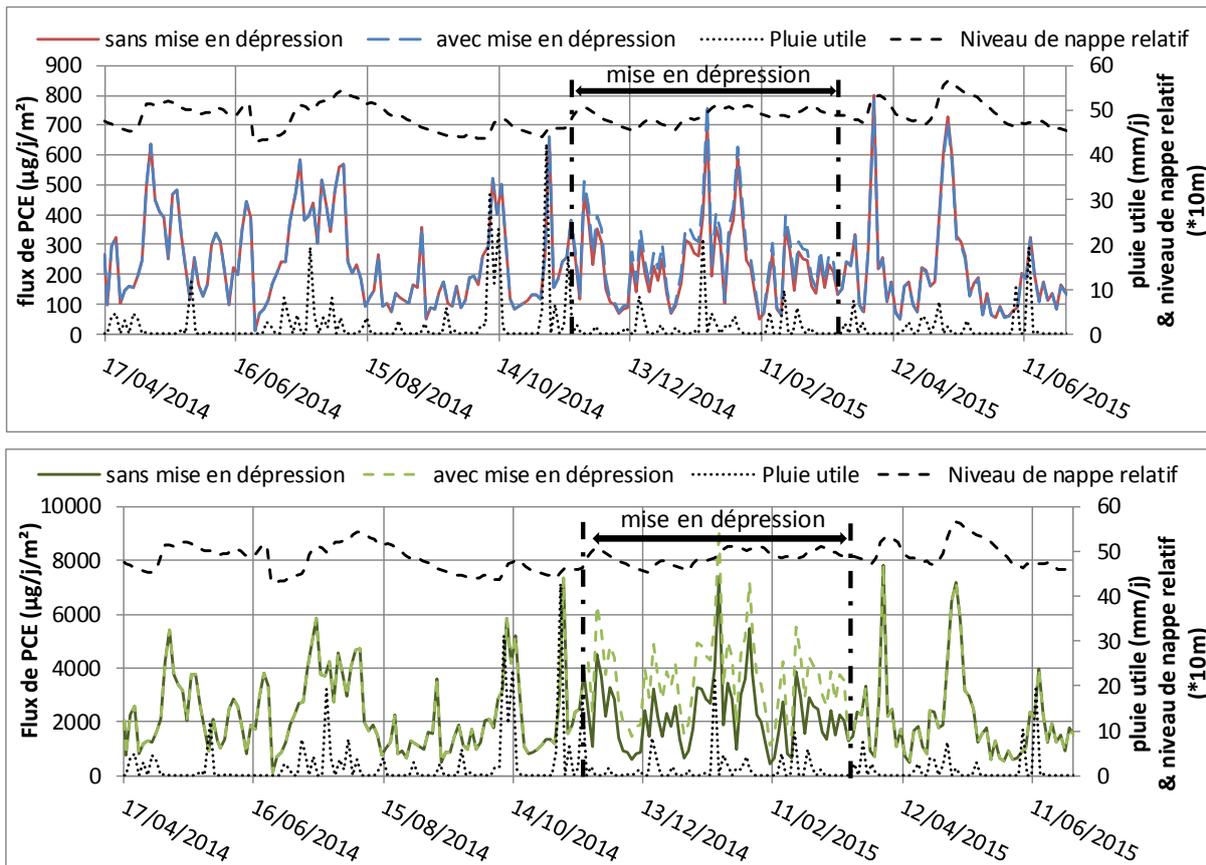


Figure 15 – Evolution des flux moyen à travers la dalle avec ou sans mise en dépression pour une source verticale sous dalle (en haut) et une source horizontale sous dalle (en bas) pour différentes lithologies (en haut, source en limite de dalle & perméabilité de dalle faible) et pour différentes perméabilités de dalle (en bas) –lithologie hétérogène et perméabilité de dalle forte

Ces simulations montrent que :

- lors de la période hivernale, les débits d'air transitant par la dalle augmentent d'un ordre de grandeur en moyenne pour une dépression de 4 Pa (Tableau 6). Malgré cela, les nombres de Péclet modélisés sont modérés. Ils sont compris entre 0.3 et 3 avec une moyenne de 1.2. En moyenne, convection et diffusion participent ainsi à parts quasi-égales au transfert à travers la dalle. Bien que le flux convectif de polluant gagne en importance lors de la mise en dépression à 4 Pa, il reste modeste en comparaison au flux total ;
- l'augmentation de la part convective a un effet mineur sur le flux moyen traversant la dalle : celui-ci est peu influencé par la mise en dépression, il en est de même pour la concentration moyenne sous dalle. Il est à noter que, avec une mise en dépression de 40 Pa, le transport est majoritairement convectif (nombre de Péclet entre 11 et 13) et l'augmentation des flux moyen à travers la dalle est notable (d'un facteur compris entre 2 et 3) ;



- par contre, pendant l'épisode hivernal, le flux moyen émis vers l'atmosphère est atténué (d'un facteur 2 à 3 selon les situations) du fait de l'entrée d'air propre depuis l'atmosphère vers le sol ;
- les écoulements d'air étant plus important aux abords de la limite de dalle que lorsqu'on s'en écarte (hors dalle mais également sous dalle), les écoulements d'air générés par la dépression du bâtiment induisent une atténuation des concentrations dans les gaz du sol localisée essentiellement dans cette zone, et ce jusqu'à un facteur 6 (au point d'observation O1 dans les remblais et pour une source horizontale). Plus on s'éloigne de la limite de dalle, moins les concentrations sont influencées par la mise en dépression. Ainsi, les concentrations ne sont plus atténuées que de 20% à 30m de la limite de dalle (lorsque la source est verticale sous dalle) ;
- les concentrations en profondeur peuvent varier de différentes façons selon la position relative de la source et de la dalle. Ainsi les concentrations peuvent n'être que faiblement influencées par la mise en dépression si l'air propre arrivant de la surface se charge à travers la zone source avant d'arriver sous la dalle (cf. Figure 16) ;
- notons que l'atténuation des concentrations dans les gaz du sol proches de la limite de dalle lors de la période de chauffe peut persister au-delà et plusieurs mois après (la concentration ne remonte que très lentement dans les 6 mois qui suivent). En effet la réalimentation du panache, qui se fait en régime diffusif, est très lente sur les points les plus éloignés de la source (cf. chapitre 3.1). Ainsi les niveaux de concentration dans les gaz du sol peuvent être localement différents d'une année sur l'autre dans cette situation.



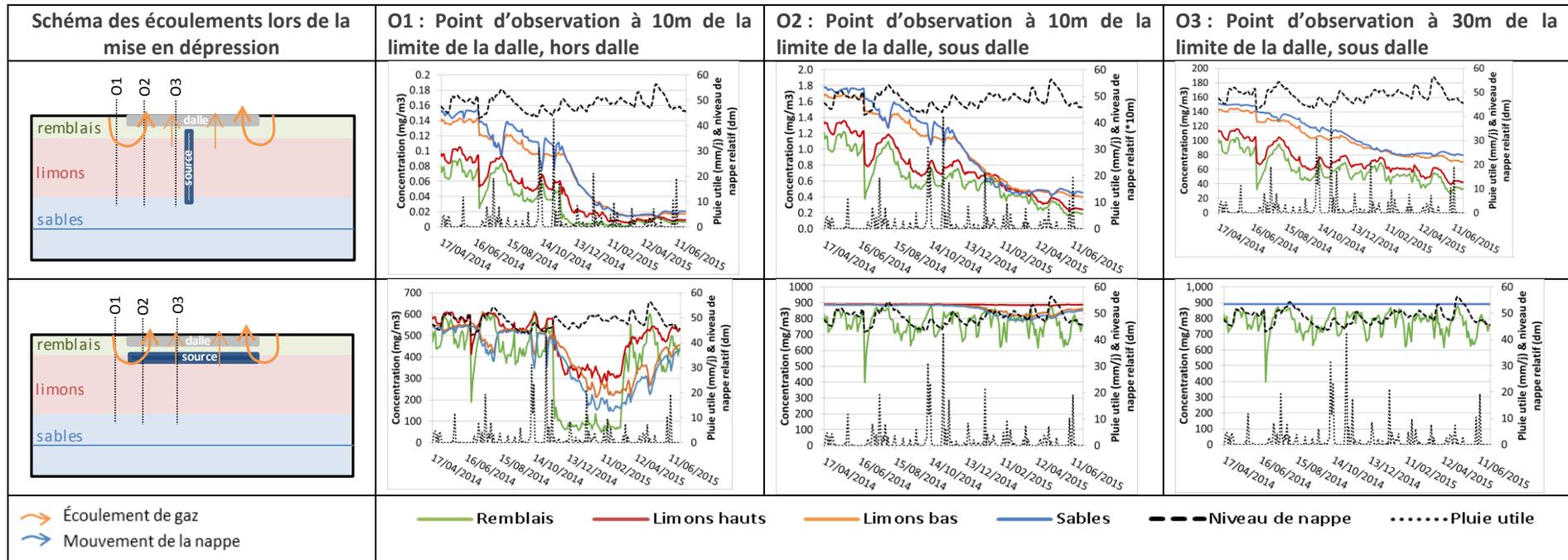


Figure 16 – Influence du tirage thermique sur les concentrations en différentes localisations pour différents types de source (lithologie hétérogène, perméabilité de dalle forte, nappe à 5m)



5. Conclusions et recommandations

La reconversion urbaine nécessite sur les sites à passif environnemental d'évaluer les risques pour la santé induits par l'existence de pollutions volatiles dans le milieu souterrain. L'établissement des mesures de gestion nécessite une caractérisation approfondie des concentrations en polluants volatils dans les gaz du sol et la modélisation prospective des impacts. Par ailleurs, sur des bâtiments où la qualité de l'air intérieur est dégradée par l'existence d'une pollution du sol, les mesures de gestion et l'évaluation de leur efficacité nécessite la conduite de mesures représentatives.

La conduite de telles études est bien encadrée : guide ministériel (MTES, 2017), normes pour la conduite des mesures (dont ISO 18400-204, 2017), guides méthodologiques (FLUXOBAT, 2013, BRGM-INERIS 2016) mais des incertitudes demeurent sur la représentativité des mesures de concentrations (Traverse et al, 2017). En particulier, le lien entre les facteurs de variabilité temporelle et les variations de concentration tant dans les gaz du sol que dans l'air intérieur est difficilement appréhendé et rend délicat l'interprétation des données mesurées.

Dans ce contexte, le projet EFEMAIR (2017-2018) a été réalisé en vue d'apporter des précisions sur le rôle de ces variables qui dépendent des spécificités des sites. Il vise à évaluer l'influence sur les concentrations dans les gaz du sol et dans l'air intérieur et extérieur de différentes situations en termes de nature de sol, de positionnement de la source de pollution et de perméabilité de dalle (cf. tableau ci-dessous) et en régime transitoire d'écoulement d'évaluer l'influence des variations des conditions hydrométéorologiques (pluie, variation de niveau de nappe, pression atmosphérique). Cette analyse repose sur la modélisation numérique 3D des écoulements et du transport des pollutions gazeuses sur une période d'une année durant laquelle les variations de ces paramètres ont été prises en compte de manière bi-journalière.

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

Tableau 7 – Synthèse des conditions testées

Schéma de fonctionnement

Le principal enseignement des travaux conduits est que les concentrations, les flux vers l'atmosphère et vers l'air intérieur et leurs variations sont fortement dépendants **du site**. Ceux-ci peuvent être très différents en fonction de la position relative de la source et des zones dallées, des perméabilités relatives de la dalle et des sols. Il est ainsi primordial afin de pouvoir interpréter les mesures réalisées dans les gaz du sol ou dans l'air de comprendre le fonctionnement du système considéré. Pour pouvoir établir le **schéma de fonctionnement du site**, il est nécessaire d'acquérir les connaissances quant à l'origine du panache de pollution gazeuse (localisation et nature de la source : phase organique, pollution adsorbée...), les lithologies, l'hydrogéologie, les aménagements en surface (revêtements, bâtiments) et leurs caractéristiques (qualité de dalle, ventilation...). Ce schéma de fonctionnement permet de **comprendre la dynamique du panache de pollution gazeuse** tant en surface qu'en profondeur et avec cette compréhension d'appréhender l'effet des différents facteurs hydro-météorologiques et du tirage thermique sur les variations de concentrations et de flux. Ces éléments permettent *in fine* de guider le dimensionnement des campagnes de mesure et l'interprétation des données.

La Figure 17 illustre l'écoulement des gaz suite à différents épisodes météorologiques. Les variations spatiales et temporelles des concentrations et des flux dépendent de ces schémas d'écoulements qui devront être ajustés et complétés en fonction de la position de la source de pollution, des différentes lithologies ou aménagements de surface pouvant modifier les écoulements et conduisant à des variations spécifiques au site.



A titre d'exemple, pour les gaz du sol, sur la Figure 17 (a), si la source est une infiltration située au centre de la dalle, plus les mesures de concentrations sont réalisées en bord de dalle, plus elles diminuent suite à une baisse de niveau de nappe. A contrario, si la source est en limite de dalle à gauche, les concentrations augmentent à proximité de la source sous dalle mais diminuent sur une portion plus à droite sous la dalle.

Les travaux réalisés dans le projet EFEMAIR montrent que les conséquences des variations des conditions hydrométéorologiques ne peuvent être réduites à des raisonnements simples du type « la remontée de la nappe augmente les concentrations dans les gaz du sol », la dynamique des écoulements propres au site est à considérer différemment sur chaque site.

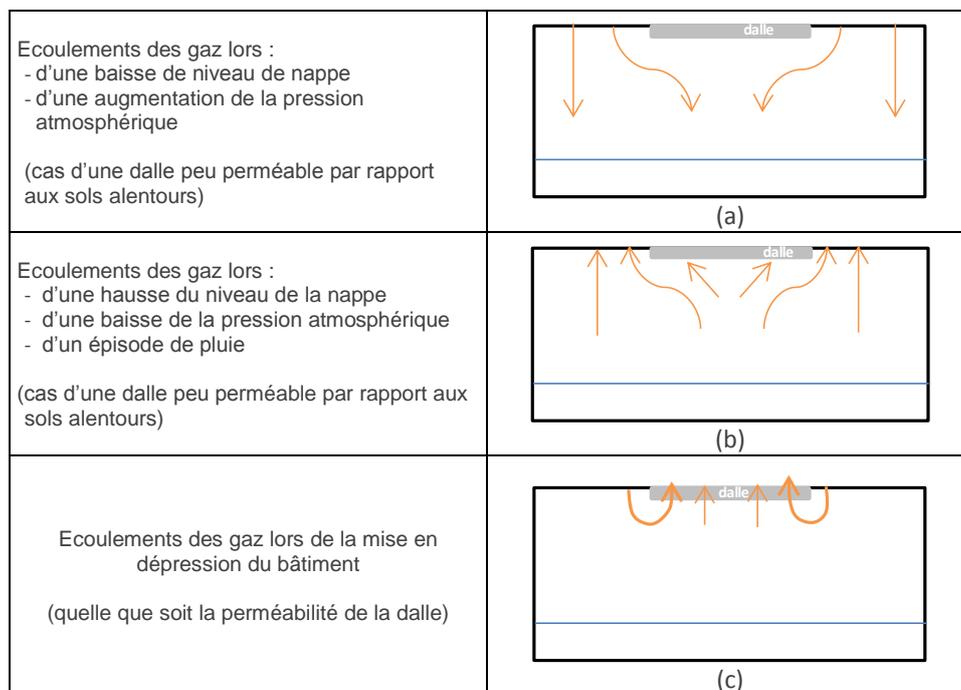


Figure 17 – Schémas de fonctionnement

Concernant l'influence des conditions hydrométéorologiques sur les concentrations, il a également été confirmé que le battement de nappe est le facteur prédominant, la pluie et la pression atmosphérique ayant une influence moindre mais non négligeable dans les configurations modélisées. En effet, les variations du niveau de nappe de l'ordre du centimètre voire de la dizaine de centimètres à l'échelle bi-journalière, se traduisent par la mobilisation d'une quantité d'eau plus importante que les volumes d'eau apportés par la pluie (de quelques millimètres à quelques dizaines de millimètres). Il est à noter que dans les chroniques intégrées aux modélisations, la pluie et le niveau de nappe sont corrélées positivement avec un léger décalage temporel, tandis que la pluie et la pression atmosphériques sont anti-corrélées.

Compte tenu de leurs influences, il est donc important de mesurer ces 3 facteurs hydro-météorologiques avec, la connaissance de l'historique précédent la campagne (une semaine pour la pluie et la nappe, quelques jours pour la pression atmosphérique). A ces facteurs s'ajoutent la température et le vent, non testés par modélisation, mais qui peuvent avoir un effet positif et notable sur les concentrations dans les gaz du sol (cf. Traverse et al, 2017).

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 meilleure spatialisation des mesures, l'erreur induite par la méconnaissance de la concentration moyenne sous un aménagement peut, en fonction de la localisation de la source et de la lithologie, être nettement supérieure à celle résultant d'un nombre limité de campagnes de mesure. En outre, la variabilité temporelle des concentrations dans les gaz du sol étant la plus importante à proximité immédiate des zones dallées (hors dalle), zone où les échanges de gaz entre les sols et l'atmosphère sont les plus forts (de 5 à 10 m de part et d'autre de la limite dans les configurations modélisées), la cartographie de la pollution devra, toutes choses



égales par ailleurs, privilégier les prélèvements sous dalle éloignés des limites avec les zones non couvertes. Cela s'applique également aux zones de transfert privilégiées qui peuvent exister (canalisations et réseaux) qui n'ont cependant pas été modélisées dans le projet.

Vis-à-vis des transferts vers l'air intérieur, pour une lithologie homogène sous la dalle, les flux montrent une variabilité temporelle d'un facteur 70 au maximum, tandis que spatialement, en présence d'une source localisée (phase organique associée à un cône d'infiltration), les variations peuvent atteindre 5 ordres de grandeur. Dans les modélisations conduites, le tirage thermique résultant de la chauffe des bâtiments influence peu les transferts en moyenne vers l'air intérieur pour une dalle portée considérée comme un milieu poreux équivalent. Des hétérogénéités des flux sont cependant notables et dépendent de la qualité de la dalle. Il convient en outre d'ajouter à cette variabilité spatiale et temporelle l'existence de chemins préférentiels comme les fissures de retrait ou les traversées de dalle par les réseaux divers (eau, gaz, électricité...) qui pourraient conduire à modifier les transferts et l'impact des conditions hydro-météorologiques, du tirage thermique et de la ventilation.

Il est par ailleurs à conserver en mémoire que les concentrations dans l'air intérieur étant dépendantes non seulement du flux mais également de la dilution induite par la ventilation des bâtiments, les variations spatiales du renouvellement d'air ainsi que ses variations temporelles peuvent conduire à augmenter significativement les hétérogénéités et les variations temporelles par rapport à celles modélisées. Ainsi, en complément de l'analyse des transferts de la pollution du sol, il faut souligner l'importance d'acquérir les paramètres d'influence propres au bâtiment (ventilation, chauffage, température intérieure, vent, ...) afin d'appréhender et d'interpréter la variabilité des concentrations dans l'air intérieur.

Enfin, *vis-à-vis de l'impact des pollutions sur l'air extérieur*, les modélisations conduites montrent que le flux est fortement influencé par les facteurs hydro-météorologiques, les variations temporelles modélisées peuvent atteindre 3 ordres de grandeur. Ainsi, les mesures de flux telles que décrites dans le guide FLUXOBAT (Traverse et al. 2013) ou les mesures de concentrations dans l'air extérieur doivent être interprétées également avec la connaissance du fonctionnement du système.



INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

Tableaux

Tableau 1 – Bilan de flux cumulés sur la période simulée (positif : entrant dans le modèle, négatif : sortant du modèle)	12
Tableau 2 – Débit d'air moyen à travers la dalle et vers l'atmosphère	15
Tableau 3 – Moyennes temporelles et variabilités des concentrations moyenne sous dalle pour une lithologie hétérogène	21
Tableau 4 – Moyennes temporelles et variabilités des flux massiques à travers la dalle (les valeurs sont données pour une lithologie hétérogène).....	22
Tableau 5 – Moyennes temporelles et variabilités des flux massiques vers l'atmosphère)	24
Tableau 6 – Débit d'air moyen à travers la dalle et vers l'atmosphère hors et pendant la période de chauffe (cas de la lithologie hétérogène et perméabilité de dalle forte)	26
Tableau 7 – Synthèse des conditions testées	29

Figures

Figure 1 – Géométrie et conditions aux limites du modèle	8
Figure 2 – Variations temporelles des facteurs hydro-météorologiques imposés dans les modélisations	9
Figure 3 – Analyse des séries temporelles de la pluie, de la pression atmosphérique et des fluctuations de nappe : graphiques d'autocorrélation (à gauche) et corrélogramme croisé (à droite). Nota : la corrélation croisée entre pluie et nappe est réalisée avec un différentiel de 2 jours entre les 2 signaux.....	9
Figure 4 – Position des différentes sources modélisées - schéma de principe (échelles verticale / horizontale non respectées).....	11
Figure 5 – Evolution des débits (entrant et sortant) au droit des conditions aux limites (cas d'une lithologie hétérogène).....	13
Figure 6 – Evolution des nombres de Péclet pour différentes lithologies (en haut, cas d'une perméabilité de dalle faible) et pour différentes perméabilités de dalle (en bas, cas d'une lithologie hétérogène)	14
Figure 7 – Débits le long de la dalle juste après une hausse du niveau de nappe le 3 avril 2015 – Lithologie hétérogène & perméabilité de dalle forte ($2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$)	15
Figure 8 – Evolution des débits massiques de PCE vers la surface – Lithologie hétérogène & perméabilité de dalle forte ($2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$).....	16
Figure 9 – Flux massique de PCE le long du linéaire de la dalle juste après une hausse du niveau de nappe le 3 avril 2015 (en haut) et évolution des flux par zone (en bas) – Source verticale centrée sous dalle, lithologie hétérogène & perméabilité de dalle forte	16
Figure 10 – Evolution des concentrations en différentes localisations pour différentes positions de source (lithologie hétérogène, perméabilité de dalle faible, nappe à 5 m)	19
Figure 11 – Evolution des concentrations moyennes sous dalle pour différentes positions de source (en haut - lithologie hétérogène, perméabilité de dalle faible) et pour différentes perméabilités de dalle (en bas - lithologie hétérogène, source sous dalle)	20
Figure 12 – Evolution des flux moyen à travers la dalle pour différentes lithologies (en haut, source en limite de dalle & perméabilité de dalle faible) et pour différentes perméabilités de dalle (en bas, lithologie hétérogène & source sous dalle)	22
Figure 13 – Evolution des flux moyen vers l'atmosphère pour différentes lithologies (en haut, source en limite de dalle & perméabilité de dalle faible) et pour différentes perméabilités de dalle (en bas, lithologie hétérogène & source sous dalle)	23
Figure 14 – Corrélogrammes croisées des concentrations moyennes et des flux avec les facteurs d'influence modélisés (situation où la source est horizontale sous dalle, la lithologie est hétérogène, la perméabilité de dalle est forte et la nappe est à 5m).....	25



Figure 15 – Evolution des flux moyen à travers la dalle avec ou sans mise en dépression pour une source verticale sous dalle (en haut) et une source horizontale sous dalle (en bas) pour différentes lithologies (en haut, source en limite de dalle & perméabilité de dalle faible) et pour différentes perméabilités de dalle (en bas) –lithologie hétérogène et perméabilité de dalle forte..... 26

Figure 16 – Influence du tirage thermique sur les concentrations en différentes localisations pour différents types de source (lithologie hétérogène, perméabilité de dalle forte, nappe à 5m) 28

Figure 17 – Schémas de fonctionnement 30

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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.

MTEES (2017). Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués. 19 avril 2017. www.installationsclassees.developpement-durable.gouv.fr/Outils-de-gestion.html

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.

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.





PROJET EFEMAIR

VARIABILITE DES CONCENTRATIONS DANS LES GAZ DU SOL ET DES TRANSFERTS VERS L'AIR INTERIEUR DES POLLUANTS VOLATILS

MODELISATIONS NUMERIQUES DE DIFFERENTES CONFIGURATIONS DE SOL, DE POLLUTION ET DE PERMEABILITE DE DALLE DE BATIMENT – VERSION PUBLIQUE

JUIN 2018

Résumé Le projet vise à préciser la variabilité spatio-temporelle des concentrations de polluants volatils dans les gaz du sol et des transferts vers l'air intérieur et atmosphérique au regard de plusieurs facteurs d'influence. Par le biais de modélisations numériques instationnaires sur une année, le lien entre facteurs hydro-météorologiques (battement de nappe, pluie, pression atmosphérique) et variabilités des concentrations dans les gaz du sol et des flux est analysée dans diverses situations (de positions de source, de lithologies, de qualités de dalle).

Cette étude met en évidence l'importance de comprendre le fonctionnement du système pour le dimensionnement et l'interprétation des campagnes de mesures : position de la source, lithologie, hydrogéologie, aménagements de surface et leurs caractéristiques (qualité des dallages, chemins préférentiels, ...) sont autant d'éléments qui influencent les variations des concentrations dans les gaz du sol, des flux et des concentrations dans l'air intérieur.

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie

www.ademe.fr

