

# TEMPAIR – PARTIE 1

## VARIABILITE TEMPORELLE DES CONCENTRATIONS EN PCE DANS LES GAZ DU SOL ET L’AIR INTERIEUR

Mars 2017

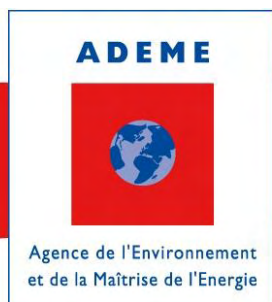
Projet R&D co-financé par l’ADEME (Convention n°1172C0051).

Sylvie TRAVERSE, Juliette CHASTANET, David PITAVAL, Lisa DORFFER et Thomas GLEIZE  
(BURGEAP)

Corinne HULOT, Fabrice RICHEZ (INERIS)



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



## REMERCIEMENTS

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

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

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

## AVANT-PROPOS

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

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

L'établissement des mesures de gestion nécessite une bonne appréhension des concentrations en polluants volatils dans les gaz du sol présentes ou futures sous un aménagement bâti. Cette estimation est rendue délicate par la variabilité temporelle des concentrations, celles-ci étant liées aux conditions environnementales et aux caractéristiques du bâtiment. Il en est de même des concentrations dans l'air intérieur dépendantes en sus des conditions de ventilation et de chauffage du bâtiment.

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

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

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

Le présent document traite de la partie 1, les deux autres parties font l'objet de documents spécifiques référencés Hulot et al. (2017) et Traverse et al. (2017). Cette partie 1 reprend les travaux conduits sur un site atelier visant à documenter le lien de causalité entre d'un côté les facteurs d'influence regroupant les conditions météorologiques (vent, pression, pluie, température, chauffage...) et les conditions hydrogéologiques et d'un autre côté les concentrations dans les gaz de sol (chapitre 2) et dans l'air intérieur d'un bâtiment (chapitre 3).

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

## SOMMAIRE

<b>Avant-propos .....</b>	<b>3</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>8</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>9</b>
<b>Synthèse.....</b>	<b>10</b>
<b>1. Objectifs et moyens .....</b>	<b>16</b>
<b>1.1 Contexte et Objectifs .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2 Moyens déployés .....</b>	<b>17</b>
1.2.1 Site atelier .....	17
1.2.1.1 Contexte environnemental .....	17
1.2.1.2 Réseau de points de mesure.....	18
1.2.1.3 Piézométrie .....	18
1.2.2 Campagnes de mesures .....	19
1.2.3 Analyseur PID utilisé .....	20
1.2.4 Modélisation numérique du panache gazeux.....	21
<b>2. Gaz du sol - Facteurs influençant la variabilité temporelle des concentrations.....</b>	<b>24</b>
<b>2.1 Analyse globale .....</b>	<b>24</b>
2.1.1 Préambule.....	24
2.1.2 Variabilité globale mesurée .....	25
2.1.3 Variabilité globale modélisée.....	26
<b>2.2 La pluie et la saturation en eau des terrains .....</b>	<b>28</b>
<b>2.3 La température.....</b>	<b>30</b>
2.3.1 Variations saisonnières .....	30
2.3.2 Variations diurnes .....	32
<b>2.4 Le vent et la pression atmosphérique.....</b>	<b>32</b>
2.4.1 Variations pluri-journalières.....	32
2.4.2 Variations diurnes .....	34
<b>2.5 Variations de niveau de nappe.....</b>	<b>35</b>
<b>2.6 Recommandations .....</b>	<b>36</b>
<b>3. Air intérieur - Facteurs influençant la variabilité temporelle des concentrations.....</b>	<b>38</b>
<b>3.1 Analyse globale .....</b>	<b>38</b>
3.1.1 Préambule.....	38
3.1.2 Variabilité temporelle mesurée.....	39
<b>3.2 Influence des variables hydrométéorologiques et du chauffage.....</b>	<b>42</b>
3.2.1 Influence du chauffage et de la température .....	42
3.2.1.1 Préambule.....	42
3.2.1.2 Température, gradient thermique et dépression .....	42
3.2.1.3 Dépressions et concentrations dans l'air intérieur .....	42
3.2.2 Influence du vent.....	45
3.2.2.1 Préambule.....	45
3.2.2.2 Influence sur la dépression Gaz du sol – Air intérieur.....	45
3.2.2.3 Influence sur les concentrations .....	46
3.2.3 Influence de la pluie et de la saturation en eau des terrains .....	48
3.2.3.1 Préambule.....	48
3.2.3.2 Résultats obtenus .....	48
3.2.4 Influence de la pression atmosphérique.....	49
3.2.4.1 Préambule.....	49
3.2.4.2 Tendances et cyclicité observées .....	49

3.2.5	Cycles diurnes et stabilité atmosphérique .....	51
3.2.5.1	Préambule.....	51
3.2.5.2	Tendance et cyclicité observées .....	51
<b>3.3</b>	<b>Recommandations .....</b>	<b>53</b>
<b>4.</b>	<b>Conclusions.....</b>	<b>55</b>
<b>5.</b>	<b>Références consultées .....</b>	<b>56</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Incidence des variables hydro-météorologiques sur les concentrations et recommandations associées.....	14
Tableau 2 – Variables hydro-météorologiques dont l'acquisition est recommandée lors des mesures.....	15
Tableau 3 – Incidence des variables météorologiques sur les concentrations dans les gaz du sol sur le site atelier.....	37
Tableau 4 - Concentrations en PCEeq dans l'air intérieur mesurées au PID (moyennes horaires) .....	39
Tableau 5 – Synthèse des corrélations ( $r^2$ de Pearson) entre les concentrations dans l'air intérieur et les conditions météorologiques.....	40

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Le site atelier.....	17
Figure 2 - Réseau de piézaires (pza) suivis et atelier dans lequel les concentrations dans l'air ont été suivies.....	18
Figure 3 - Chronique piézométrique et dates des campagnes de mesures dans les gaz du sol.....	19
Figure 4 - Comparaison des concentrations en PCE dans les gaz du sol mesurées au laboratoire par analyse chimique GC-MS ou sur site au PID .....	21
Figure 5 - Schématisation du modèle numérique .....	22
Figure 6 – Panache de concentrations en PCE modélisé en régime permanent dans la zone non saturée.....	23
Figure 7 : Variation temporelle des facteurs d'influence modélisés.....	23
Figure 8 - Chroniques de concentrations et débits massiques en PCE modélisées sur une année en fonction des variations de la pluie, de la pression atmosphérique et du niveau de nappe .....	27
Figure 9 - Corrélations des concentrations en PCEeq dans les gaz du sol avec la pluie utile.....	28
Figure 10 – Suivi des concentrations en PCEeq dans les gaz du sol et de la saturation en eau des sols .....	29
Figure 11 - Concentrations en PCEeq sur deux quadruplets en fonction de la pluie .....	30
Figure 12 - Concentrations en PCEeq dans les gaz du sol en fonction de la température dans les remblais pour une sélection de piézaires .....	30
Figure 13 - Concentrations en PCEeq sur deux quadruplets en fonction de la température .....	31
Figure 14 - Chronique de températures de l'air et des sols de juillet 2014 à août 2015 .....	31
Figure 15 - Suivi des concentrations en PCEeq dans les gaz du sol sous dalle et du gradient thermique .....	32
Figure 16 - Concentrations en PCEeq dans les gaz du sol en fonction du vent .....	33
Figure 17 – Variations diurnes des concentrations en PCEeq dans les gaz du sol et du vent.....	35
Figure 18 : Confrontation des concentrations en PCEeq dans les sables aux variations de niveau statique .....	36
Figure 19 - ACP d'une sélection de campagnes de mesure dans l'air intérieur- Représentation des variables sur les facteurs principaux.....	41
Figure 20 - Corrélations entre le gradient thermique et la concentration dans l'air intérieur lors des différents suivis réalisés .....	43
Figure 21 – Evolution du gradient thermique et de la concentration lors des campagnes 2, 3 et 4 .....	44
Figure 22 – Evolution du vent et de la dépression lors de la campagne 2 .....	46
Figure 23 - Corrélations entre le vent et la différence de pression entre l'air intérieur et un piézair sous bâtiment lors des différents suivis réalisés .....	46
Figure 24 – Evolution du vent et de la concentration lors des campagnes 2 et 3 .....	47
Figure 25 - Corrélations entre le vent et les concentrations dans l'air intérieur lors des différents suivis réalisés .....	48
Figure 26 – Pression atmosphérique et concentration dans l'air intérieur lors des campagnes 2 et 4.....	50
Figure 27 - Corrélogrammes croisés des suivis de concentration dans l'air intérieur et des variables météorologiques (nov 14 et mars 15).....	52

## RESUME

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

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

Le projet repose sur des mesures et des modélisations conduites sur un site atelier présentant une pollution des sols en PCE et dans une moindre mesure en TCE. Les facteurs d'influence étudiés sont les conditions hydro-météorologiques (niveau de nappe, pression atmosphérique, vent, température,...) et des conditions associées au bâtiment (dépression, gradient thermique).

Dans les gaz du sol, les travaux montrent une forte variabilité temporelle des concentrations avec, tant sous bâtiment qu'en dehors, des amplitudes pouvant atteindre plusieurs ordres de grandeur. Les variations ont été observées à 3 échelles : variations mensuelles, pluri-journalières et diurnes, les plus importantes étant identifiées à l'échelle mensuelle. Les variables pour lesquelles une corrélation est significative sont la température à travers les variations saisonnières, la pluie et la modification des pressions motrices dans la zone non saturée, le vent et dans une moindre mesure les variations de température atmosphérique et d'humidité relatives suivant des cycles jours/nuit. Les influences des différentes variables que sont la température, la pluie, le niveau de nappe, la pression atmosphérique, le vent et l'humidité relative n'ont pu cependant être discriminées dans les interprétations réalisées. La modélisation numérique 2D du site atelier considérant une chronique de pluie, de pression atmosphérique et de niveau de nappe sur une durée de un an a mis en évidence l'influence théorique de chacune de ces variables et les effets antagonistes ou synergiques lors de certains épisodes. Ces résultats montrent d'une part la difficulté d'interpréter les variations de concentrations et d'autre part la nécessité de prendre en compte de manière conjointe l'ensemble des variables d'influence.

Dans l'air intérieur, les campagnes de mesures mettent en évidence des variations pouvant atteindre un ordre de grandeur. Les variations sont observées à 3 échelles : variations saisonnières, pluri-journalières et diurnes. Sur le site étudié, les concentrations dans l'air intérieur sont corrélées à l'ensemble des variables, les variables majeures sont le vent, la température, le gradient thermique et la différence de pression intérieur-extérieur et l'humidité relative. Il a également été mis en évidence l'absence de lien univoque entre les concentrations et chacune des variables météorologiques, avec des corrélations positives sur certaines campagnes et négatives sur d'autres. Seule la dépression du bâtiment vis-à-vis des gaz du sol présente sur toutes les campagnes une corrélation positive (qui n'est cependant pas toujours significative). Les interprétations des concentrations dans l'air intérieur n'auraient pu être conduites sans la compréhension des transferts de la pollution gazeuse dans le milieu souterrain. Cela conduit à recommander l'acquisition lors de campagnes de la qualité de l'air intérieur, en plus des éléments liés aux activités dans les espaces bâtis, des conditions de ventilation, de chauffage et hydro-météorologiques, des concentrations dans les gaz du sol et/ou les lieux de transfert.

Des recommandations sont formulées quant à l'acquisition de ces variables et leur interprétation. Nous estimons cependant que l'interprétation de leur influence ne peut être généralisée, car elle dépend de nombreux facteurs qu'il convient d'intégrer au travers d'une analyse du fonctionnement du système et de la dynamique spécifique des pollutions gazeuses sur le site étudié.



## ABSTRACT

The assessment of soil contamination, mechanisms of transfer and impacts in the indoor air through diagnostics first deals with concentrations in soils, water and soil gas as Integrator environment. In the presence of buildings, located over a source of contamination or a plume, assessment of exposure concentrations is based on diagnoses in indoor air. Recommendations are made in multiple guides for the design, implementation and interpretation of measured concentrations in soil gas and indoor air. However, given the high temporal variability of these concentrations, practitioners still have difficulties in interpretation.

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

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

The project is based on measurements and modeling conducted at a experimental site contaminated with tetrachlorethylene (PCE) and to a lesser extent trichlorethylene (TCE) both in vadose and saturated zone. The investigated influence factors are the hydro-meteorological conditions (groundwater level, atmospheric pressure, wind, temperature ...) and the conditions associated with the building (depression, thermal gradient).

*In the soil gas*, measurements confirm a strong temporal variability of the concentrations with amplitudes up to several orders of magnitude both under and outside the building. Variations were observed at 3 time scales: monthly, multi-day and diurnal variations. The most important are identified on a monthly scale. Correlations were significantly highlighted for temperature through seasonal variations, rainfall and changes in pressures in the vadose zone, wind and to a lesser extent changes in temperature, relative humidity according to day / night cycles. The influences of temperature, rain, water table, atmospheric pressure, wind and relative humidity could not be discriminated in the interpretations. The transient 2D numerical modeling of the experimental site, allow to investigate rainfall, atmospheric pressure and water table effects. It demonstrate the theoretical influence of each of these variables and at some episodes their antagonistic or synergistic effects. Those results confirm on the one hand the difficulty of interpreting variations in soil gas concentration and, on the other hand, the need to consider all the variables together.

*In indoor air*, the project shows variations of average concentrations up to an order of magnitude. Variations are observed at 3 time scales: seasonal, multi-day and diurnal. At the workshop site, indoor air concentrations seems to be correlated with all variables, with major influence of wind, temperature, thermal gradient, indoor-outdoor pressure difference and relative humidity. The lack of an unambiguous link between the concentrations and each of the meteorological variables was also demonstrated, with positive correlations on some campaigns and negative correlations on others. Only the depression of the building presents always a positive correlation (which is however not always significant). Interpretations of indoor air concentrations variability couldn't have been done without understanding the soil gas transfers. This leads to recommend acquisition, during indoor air sampling, of soil gas concentrations and/or concentrations in transfer locations in addition to elements related to activities in building, ventilation, heating and hydro-meteorological conditions.

*Recommendations* are made for the acquisition and interpretation of these variables. We believe, however, that the interpretation of their influence cannot be generalist and depends on many factors that should be integrated through an analysis of the specific dynamics of gaseous contamination of the site.

## SYNTHESE

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

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

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

### **La problématique de la variabilité temporelle des concentrations dans les gaz du sol et l'air intérieur**

La littérature et les guides français (BRGM-INERIS, 2016 ; FLUXOBAT, 2013, etc.) traitant de la mesure des concentrations dans les gaz du sol et l'air intérieur mettent en exergue la forte variabilité temporelle des concentrations tant dans les gaz du sol que dans l'air intérieur. L'influence de différents facteurs a pu être étudiée séparément comme le niveau de nappe, la pression atmosphérique ou le vent. Cependant, l'analyse conjointe de l'ensemble des facteurs d'influence (conditions météorologiques, niveaux de nappe, chauffage du bâtiment...) sur les concentrations dans ces matrices n'a pas été étudiée, ne permettant pas de discriminer en fonction des sites et des contextes les différents paramètres majeurs à acquérir et à interpréter lors des diagnostics.

Les travaux conduits dans le cadre de TEMPAIR visent à documenter sur un site atelier le lien de causalité entre d'un côté les facteurs d'influence regroupant les conditions météorologiques (vent, pression, pluie, température, humidité) et du bâtiment (dépression, gradient thermique) et d'un autre côté la variabilité temporelle des concentrations dans les gaz de sol et dans l'air intérieur d'un bâtiment.

*In fine* l'objectif est de discriminer les différents paramètres majeurs à acquérir et à interpréter lors de ces diagnostics, afin d'émettre des recommandations opérationnelles pour le dimensionnement et l'interprétation des mesures. Leurs complémentarités avec le guide BRGM-INERIS (2016) et le guide FLUXOBAT (Traverse et al. 2013) sont mentionnées.

### **Variabilité temporelle des concentrations dans les gaz du sol**

La variabilité temporelle des concentrations dans les gaz du sol est induite par les conditions météorologiques et hydrologiques qui influencent généralement les transferts de polluants et donc les concentrations à trois échelles de temps :

1. Tout d'abord l'effet immédiat associé à une variation de pression ;
2. Puis le rééquilibrage des pressions dans la zone non saturée, conduisant à des écoulements gazeux durant plusieurs jours ;
3. Enfin, une échelle de temps plus longue au cours de laquelle le transport diffusif peut modifier les concentrations.

Ainsi, la variation des concentrations en COV dans les gaz du sol a été étudiée :

- au niveau horaire (effet immédiat associé à une variation de pression),
- au niveau journalier, liée au cycle diurne/nocturne (associé aux variations entre le jour et la nuit des conditions météorologiques),
- au niveau pluri-journalier (liée au rééquilibrage des pressions),
- au niveau inter-saisonnier (variations de transport diffusif liés par exemple à la température ou la pluie et du transport convectif lié aux variations de perméabilité ou de pression dont par exemple une dépression créée par un bâtiment chauffé).

Entre mai 2014 et août 2015, 13 campagnes de mesures de concentration en  $PCE_{eq}^1$  au PID (détecteur par photo ionisation) dans 19 piezaires majoritairement sous bâtiment jusqu'à une distance d'une trentaine de mètres de la source hors bâtiment ont été conduites. Les piezaires crépinés sur une hauteur de l'ordre de 30 à 50 cm permettent de prélever les gaz dans les différents horizons lithologiques en présence : remblais (0-1 m), limons (1 à 2,5 m) ou sables (la nappe est présente sur le site vers 5 m de profondeur). Sur cette période, trois suivis en continu des concentrations ont été réalisés durant 3 à 6 jours sur des ouvrages captant les remblais et/ou les limons. Enfin une modélisation numérique des transferts en zone non saturée a été conduite afin de simuler l'influence couplée ou non des variables météorologiques.

Rappelons que les résultats obtenus sont dépendants de la lithologie du site, de la localisation de la pollution et des caractéristiques du bâtiment. Le rôle des limons en position centrale du profil lithologique est déterminant pour les écoulements dans la zone non saturée et *in fine* pour les variations des concentrations puisqu'ils limitent les transferts verticaux des sables vers la surface du sol. Avec d'autres successions de lithologies mais également avec une source et des caractéristiques différentes du bâtiment et des recouvrements, les transferts gazeux et les variations de concentrations en résultant pourraient être très différents. Ainsi, les constats présentés ci-après (variations spatiales et temporelles des concentrations des gaz du sol) restent spécifiques à ce site d'étude.

#### Variations spatiales

Sous la dalle du bâtiment de 160 m<sup>2</sup>, mentionnons la forte variabilité des concentrations en PCE au sein de chaque horizon capté qui, en fonction des campagnes, est compris entre un facteur 20 et un facteur 5000. En moyenne pour l'ensemble des campagnes, la variabilité spatiale en plan est de 2 ordres de grandeur dans les remblais dans la partie haute des limons et dans les sables, et atteint 3 ordres de grandeur dans la partie basse des limons. La variabilité verticale est également mise en évidence avec des écarts de concentrations entre les différentes lithologies en moyenne de 1 à 2 ordres de grandeur.

#### Variations pluri-journalières et diurnes

Les concentrations dans les gaz du sol sous dalle ont été suivies en continu au PID pendant 3 campagnes de 3 à 6 jours. L'amplitude maximale de variation sur un même point de mesure (facteur 10) est associée à l'impact de la pluie et du vent. Parallèlement, bien que de moindre amplitude (de l'ordre de 10%), il a été mis en évidence les variations diurnes de concentrations dans les gaz du sol traduisant l'effet des conditions nocturnes (vent faible, gradient thermique intérieur-extérieur plus élevé) sur un transfert accru des polluants, les concentrations dans les gaz du sol ayant tendance à augmenter de la fin de journée au matin et à diminuer durant la journée.

#### Variations saisonnières

Entre mai 2014 et août 2015, les 13 campagnes de mesures ponctuelles de concentration ont montré des variations temporelles de concentration sur l'ensemble des profondeurs quelle que soit la distance à la source. Globalement, l'amplitude des variations temporelles est plus importante dans les limons (facteur 6 à 300), puis dans les sables (facteur 18 à 190) et enfin dans les remblais (facteur 11 à 25). Mentionnons enfin qu'à 30 mètres de la source, les concentrations dans les gaz du sol présentent encore une variation temporelle significative.

<sup>1</sup> La conduite de mesures de concentration au PID est adaptée compte tenue de la part largement majoritaire du PCE dans les gaz du sol. Aux concentrations mesurées en équivalent isobutylène sont appliquées un facteur de correction permettant de déduire la concentration en PCE équivalente notée  $PCE_{eq}$

### Variables d'influence

Les corrélations entre les concentrations et les variables d'influence ont été étudiées à travers l'analyse graphique des suivis, les coefficients de corrélation de Pearson et une modélisation numérique 2D intégrant les historiques de pluie, de pression atmosphérique et de niveau de nappe. Les variables qui sont corrélées significativement avec les concentrations sont :

- à l'échelle des suivis mensuels mettant en évidence les plus fortes variations de concentrations :
  - ✓ la pluie,
  - ✓ la température atmosphérique et dans les sols,
  - ✓ l'amplitude du vent,
  - ✓ à travers la modélisation numérique uniquement : les variations des niveaux de nappe et de pression atmosphérique ;
- à l'échelle pluri-journalière et diurne pour lesquelles les variations de concentrations observées sont moindres :
  - ✓ la pluie,
  - ✓ l'amplitude du vent,
  - ✓ et les conditions nocturnes de stabilité atmosphérique : vent et température atmosphérique faibles, gradient thermique intérieur-extérieur et humidité relative plus élevés.

### Variabilité temporelle des concentrations dans l'air intérieur

4 campagnes de suivi au PID des concentrations dans l'air intérieur du site atelier instrumenté de TEMPAIR (bâtiment sans usage mais avec possibilité de chauffage) sur des durées de 2 à 9 jours ont été réalisées entre mai 2014 et août 2015.

Les résultats des mesures, s'ils sont dépendants du site (bâtiment, pollution, lithologie...) et ne peuvent donc être transposés à l'ensemble des situations de site, mettent en évidence des phénomènes météorologiques qu'il convient de prendre en compte dans l'interprétation des mesures de concentration dans l'air intérieur. S'ils peuvent sensibiliser les prestataires sur les variables à prendre en compte en plus des mesures de concentrations en polluants, la complexité des résultats ne permet cependant pas de fournir une grille simple d'aide à l'interprétation de la variabilité temporelle des concentrations en polluants.

#### Variations saisonnières

Les écarts entre les concentrations moyennes établies pour chaque période atteignent un ordre de grandeur, allant de 250 à 2100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en  $\text{PCE}_{\text{eq}}$ . Les concentrations moyennes les plus élevées sont mesurées lors d'une des campagnes hivernales (période de chauffe du bâtiment). Mentionnons qu'une seconde campagne menée en fin d'hiver montre quant à elle des concentrations moyennes analogues à celles mesurées au printemps et en été. Au printemps et en été, sur les 3 périodes de suivi, les concentrations moyennes sont proches (écarts inférieurs à un facteur 1,2).

#### Variations pluri-journalières et diurnes

Les évolutions des concentrations en PCE dans l'air intérieur mesurées font ressortir :

- des variations suivant une cyclicité de 24 heures. Les amplitudes des variations sont en moyenne d'un facteur 1,5 à 2. Elles sont observées tant pour les campagnes hivernales que pour la campagne estivale ;
- pour certaines campagnes, des tendances plus longues pluri-journalières associées à des conditions de stabilité atmosphérique présentes sur plusieurs jours (faible dispersion atmosphérique des pollutions). Les augmentations de concentrations mesurées sont alors d'un facteur 2 à 7 (proche des variations saisonnières identifiées).

### Variables d'influence

Les corrélations entre les concentrations et les variables d'influence lors de chacune des campagnes ont été étudiées à travers l'analyse graphique des suivis, les coefficients de corrélation de Pearson, des analyses en composantes principales et des analyses statistiques des séries temporelles pour certaines campagnes. Les variables qui pour au moins une des campagnes sont corrélées significativement avec les concentrations sont les suivantes :

- l'humidité relative extérieure ou intérieure (liée à la cyclicité journalière ou pour l'humidité extérieure aux périodes de forte stabilité atmosphérique),
- la température extérieure (liée à la cyclicité journalière ou aux périodes de stabilité atmosphérique) et intérieure (lié à l'effet du chauffage ou la cyclicité journalière),

- le gradient thermique (lié à l'effet du chauffage et aux périodes de stabilité atmosphérique),
- le vent (lié à la cyclicité journalière),
- la différence de pression entre les gaz du sol et l'air intérieur (liée majoritairement à l'effet du chauffage et à la baisse des températures extérieures).

Les interprétations conduites sur le site atelier permettent d'expliquer les corrélations mises en évidence entre ces variables et les concentrations. Il est à noter que les variables étant liées les unes aux autres, l'interprétation nécessite leur prise en compte conjointe. Pour les corrélations qui sont positives ou négatives en fonction des campagnes, (comme le vent), les différences de comportements sont vraisemblablement liées en partie aux historiques de pluie (et donc aux modifications de la saturation en eau des sols et aux états de surpression ou de dépression dans les terrains) qui modifient la provenance des gaz sous la dalle et l'effet du vent. Ces interdépendances non identifiées dans les guides BRGM-INERIS (2016) et FLUXOBAT (2013) conduisent à des recommandations spécifiques sur la compréhension globale du système pour interpréter les concentrations en polluants.

### **Recommandations**

L'ensemble des recommandations formulées sont cohérentes avec celles présentes dans les guides FLUXOBAT et BRGM-INERIS. Il est à noter cependant que le projet TEMPAIR met en exergue les effets de certaines variables météorologiques sur les concentrations spécifiques à chaque site et pouvant être synergiques ou antagonistes. Ces travaux conduisent à recommander une interprétation préalable du fonctionnement dynamique du panache gazeux spécifique au site. Par ailleurs, il est montré l'influence des conditions de stabilité atmosphérique, nécessitant d'être intégrée à l'interprétation des mesures de concentration dans l'air.

Les travaux réalisés mettent en exergue l'importance de bien appréhender **le fonctionnement du système** pour pouvoir interpréter la variabilité temporelle des concentrations. Sans cette vision dynamique du panache de la pollution gazeuse, l'interprétation des mesures est incertaine, voire ne peut être conduite. Les éléments conditionnant ce fonctionnement sont les suivants :

- pour les gaz du sol : la succession lithologique, la profondeur et les variations de niveau de nappe, la direction et l'amplitude du vent, la localisation et les caractéristiques des revêtements de sol et des bâtiments, la pluviométrie et la localisation de la source ;
- pour l'air intérieur : les paramètres sont ceux permettant d'appréhender la variabilité dans les gaz du sol ainsi que les conditions du transfert et de la dilution dans l'air : chauffage, fonctionnement de la ventilation, vent, stabilité atmosphérique et activités et pratiques pendant les mesures.

La compréhension du fonctionnement du système repose également sur la réalisation de plusieurs campagnes pour intégrer la variabilité de ces conditions (voir ci-après), les périodes les plus propices ne pouvant être fixées *a priori* car elles sont dépendantes des spécificités du site, du réseau de mesure et des objectifs de l'étude. Pour les gaz du sol, la réalisation de mesures de concentrations réparties à différentes profondeurs et suivant un espacement adapté est également recommandée. Pour l'air intérieur, il est préconisé la mesure en parallèle des concentrations dans les terrains sous dalle ou dans les lieux de transfert ou à défaut en périphérie du bâtiment.

Compte tenu du nombre généralement limité de campagnes dans le cadre d'une étude, l'anticipation des effets potentiels des variations de conditions hydro-météorologiques et de chauffage/ventilation du bâtiment est nécessaire afin d'interpréter les concentrations mesurées et si possible de définir les périodes les plus propices.

Rappelons que le dimensionnement d'une campagne de mesures est également dépendant des objectifs de l'étude. En effet, la recherche de source, l'identification d'un potentiel de transfert vers un bâtiment existant, l'estimation des impacts dans un futur bâtiment ou la surveillance nécessitent un dimensionnement spécifique (BRGM-INERIS, 2016 ; FLUXOBAT, 2013). Les recommandations présentées ci-dessous sont donc à adapter à l'objectif de l'étude dans une approche proportionnelle et progressive..

**TABLEAU 1 – INCIDENCE DES VARIABLES HYDRO-METEOROLOGIQUES SUR LES CONCENTRATIONS ET RECOMMANDATIONS ASSOCIEES**

Variable	Incidence sur les concentrations	Recommandations
Température	<p>Dans les gaz du sol : les travaux réalisés montrent que l'augmentation saisonnière de la température dans les sols peut conduire à une augmentation des concentrations dans les gaz du sol, que ce soit sous dalle ou en zone non recouverte.</p> <p>Dans l'air intérieur : les travaux réalisés montrent que l'augmentation hivernale du gradient thermique en présence de chauffage peut conduire à une augmentation des concentrations dans l'air intérieur.</p>	<p>La réalisation d'une campagne dans les gaz du sol <i>a minima</i> en été est recommandée si des modifications de température peuvent impacter le panache gazeux. Vis-à-vis des transferts vers l'air intérieur, sous bâtiment, il conviendra également de conduire des campagnes en période de chauffage.</p> <p>Dans l'air intérieur, des mesures en période de chauffage sont nécessaires.</p>
Pluie	<p>Dans les gaz du sol : les travaux réalisés montrent que l'effet de la pluie sur les concentrations dans les gaz du sol dépend des zones d'infiltration, du temps écoulé entre la pluie et la mesure et de la localisation des points de mesure par rapport aux zones d'infiltration, aux revêtements de sols et à la source.</p> <p>Dans l'air intérieur : l'effet de la pluie a été observé sur l'augmentation des concentrations sur le site atelier, cependant on peut suspecter un effet différent dépendant dans d'autres configurations.</p>	<p>En fonction de l'objectif, il convient d'anticiper l'effet théorique de la pluie sur les concentrations aux points d'intérêt (identification des zones d'infiltration, du ruissellement, prise en compte de l'évapotranspiration). Afin de ne pas mésestimer les concentrations dans les gaz du sol, il convient d'éviter les mesures juste après un épisode pluvieux, des modifications importantes mais transitoires de concentrations pouvant être attendues à ces moments.</p>
Niveau de nappe  Pression atmosphérique	<p>Sur le site étudié, le lien entre les concentrations et les variations de niveau de nappe ou de pression atmosphérique n'a pas été clairement identifié. Cependant, les travaux de modélisation réalisés montrent un impact de la hausse du niveau de nappe et de la baisse de la pression atmosphérique sur l'augmentation des concentrations et les flux vers l'air intérieur.</p>	<p>En fonction de l'objectif, il convient d'anticiper l'effet théorique des variations de niveau de nappe, des variations de pression atmosphérique et du vent (direction et amplitude) sur les concentrations.</p> <p>Ces effets dépendent de la lithologie, de la localisation de la source, de la localisation et des caractéristiques des bâtiments et des revêtements de sol. Ainsi, il ne peut être préconisé de manière générique des périodes adaptées à la conduite de campagnes de mesure, celles-ci sont à établir au cas par cas.</p>
Vent	<p>Sur le site étudié, l'amplitude du vent a un effet positif sur les concentrations dans les gaz du sol.</p> <p>Les directions du vent ont par ailleurs été identifiées comme un facteur d'interprétation des concentrations mesurées dans l'air intérieur.</p>	<p>Ces effets dépendent de la lithologie, de la localisation de la source, de la localisation et des caractéristiques des bâtiments et des revêtements de sol. Ainsi, il ne peut être préconisé de manière générique des périodes adaptées à la conduite de campagnes de mesure, celles-ci sont à établir au cas par cas.</p>

Des travaux réalisés, il ressort l'influence significative de l'ensemble des variables suivies sur les variations de concentrations dans l'air intérieur et dans les gaz du sol. Les effets synergiques et antagonistes de ces variables et le fait que le système étudié présente une forte dynamique rendent délicate leur analyse différenciée. Ainsi, les variables nécessaires à l'interprétation des variations des concentrations qu'il est recommandé d'acquérir durant les campagnes sont présentées dans le tableau suivant. Les variables dont l'historique avant les campagnes de mesures est recommandé y sont identifiées, la durée de cette période préalable dépendant du site.

Pour l'air intérieur, en sus de ces variables, et comme préconisé dans les guides BRGM-INERIS (2016) et FLUXOBAT (2013), il est recommandé la conduite en parallèle de mesures dans les gaz du sol ou les zones de transfert et le recueil des caractéristiques des usages du bâtiment et des zones de transfert (ventilation, chauffage, connections entre espaces, ...) durant les mesures.

**TABLEAU 2 – VARIABLES HYDRO-METEOROLOGIQUES DONT L'ACQUISITION EST RECOMMANDEE LORS DES MESURES**

Variable	Gaz du sol hors bâtiment	Gaz du sol sous bâtiment	Air intérieur
Température intérieure		X	X
Température extérieure	X + historique	X+ historique	X+ historique
Température dans les sols	X	X	(X)
Dépression intérieure-extérieure ou intérieure-GdS		(X) *	(X) *
Humidité relative intérieure			X
Humidité relative extérieure et ensoleillement	X + historique	X+ historique	X + historique
Pluie brute, Pluie utile et zones d'infiltrations	X+ historique	X+ historique	X+ historique
Amplitude du vent	X+ historique	X+ historique	X+ historique
Direction du vent	X	X	X
Niveau de nappe et évolution	X+ historique	X+ historique	X+ historique
Pression atmosphérique et évolution	X+ historique	X+ historique	X+ historique

\* Peut-être pertinente. Néanmoins, compte tenu de la complexité de la mesure, elle ne peut être recommandée dans tous les contextes. A minima la connaissance du gradient thermique est recommandée

Considérant la variabilité temporelle mise en évidence, les recommandations suivantes sur les durées et périodes de mesures pour la caractérisation des concentrations dans l'air intérieur en vue d'évaluer l'exposition des populations sont formulées, les deux premiers points étant mentionnés dans les guides FLUXOBAT (2013) et BRGM-INERIS (2016) :

- Conduire les mesures sur des périodes les plus longues possible. Compte tenu des dispositifs actuellement disponibles, cela exclut les prélèvements sur des durées de 8 ou 24h et privilégie les échantillonneurs passifs sur des périodes de 5 jours *a minima* ;
- Conduire plusieurs campagnes de mesures en conditions contrastées avec *a minima* une campagne en conditions hivernales. Si le guide BRGM-INERIS (2016) préconise 2 campagnes *a minima*, les travaux réalisés nous conduisent à en recommander 3 *a minima* ;
- Enfin, la cyclicité journalière des concentrations mise en évidence peut amener dans certains contextes à adapter les périodes de prélèvement. Cette adaptation est d'autant plus importante en présence d'une modulation des débits de ventilation distinguant les périodes de fréquentation du bâtiment.

### **Perspectives**

Pour la caractérisation des concentrations en COV dans l'air intérieur, des travaux de développement sur les échantillonneurs semblent nécessaires afin de réduire les incertitudes associées à la représentativité temporelle des concentrations mesurées.

Vis-à-vis de la variabilité temporelle des concentrations dans les gaz du sol et des débits massiques vers l'air intérieur liées aux conditions météorologiques, parce qu'elles sont dépendantes de la localisation de la source, de la perméabilité de l'interface bâtie et des caractéristiques lithologiques des sols, des travaux permettant d'aider les prestataires dans l'anticipation et l'interprétation de cette variabilité paraissent nécessaires.

Enfin, le nombre de campagnes de mesures étant généralement limité, la question de la prise en compte de la variabilité temporelle des concentrations dans les gaz du sol et dans l'air intérieur est posée, en particulier dans le cadre des évaluations de risques réalisées dans les démarches IEM ou plan de gestion], il est suggéré qu'une méthodologie commune aux gaz des sols et à l'air intérieur soit recherchée afin de limiter les incertitudes associées.

# 1. Objectifs et moyens

## 1.1 Contexte et Objectifs

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

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

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

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

A l'heure actuelle, la variabilité temporelle des concentrations dans l'air intérieur a été largement documentée [Traverse et al. (2013), ADEME (2013a), ATTENA (2013)] et l'influence des variables météorologiques prises une à une étudiées par plusieurs auteurs [niveau de la nappe (Marzougui, 2013), pression atmosphérique (Massman et Ferrier, 1992), vent (Kojima & Nagano, 2000)]. Toutefois, l'analyse conjointe de l'ensemble des facteurs d'influence (conditions météorologiques, niveaux de la nappe, chauffage du bâtiment...) sur les concentrations dans l'air intérieur et les gaz du sol ne semble pas avoir été étudiée, ne permettant pas de discriminer les paramètres prépondérants à acquérir lors de ces diagnostics. Rivett et al. (2011), à travers une revue de la littérature sur le transport des COV dans la zone non saturée mettent en effet en exergue le manque de connaissance et de compréhension sur l'aspect transitoire des transferts gazeux.

Le guide FLUXOBAT (Traverse et al. 2013) présente les fondements théoriques de cette variabilité temporelle des concentrations dans les gaz du sol et l'air intérieur. Dans la future norme NF ISO10381-7 (en cours de révision) et dans le guide BRGM-INERIS (2016), les conséquences opérationnelles de cette variabilité sont présentées à travers le besoin de connaissance des conditions météorologiques lors des mesures et la conduite de plusieurs campagnes dans un objectif de connaissance de l'impact d'une pollution dans les gaz du sol de la zone non saturée.

L'objectif du projet TEMPAIR est d'analyser la variabilité temporelle des concentrations en PCE dans les gaz du sol et l'air intérieur d'un site atelier au regard des facteurs environnementaux pouvant influencer les concentrations et les transferts au sein de la zone non saturée afin de proposer des éventuelles recommandations complémentaires pour le dimensionnement et l'interprétation des mesures.

---

<sup>2</sup> Aujourd'hui BASOL recense 5800 sites pollués incluant les terrains pour lesquels l'Etat a été informé de l'existence d'une pollution tandis que BASIAS recense 262 000 sites qui ont accueilli par le passé une activité industrielle ou de service et qui sont donc susceptibles de présenter des pollutions.



## 1.2 Moyens déployés

### 1.2.1 Site atelier

#### 1.2.1.1 Contexte environnemental

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

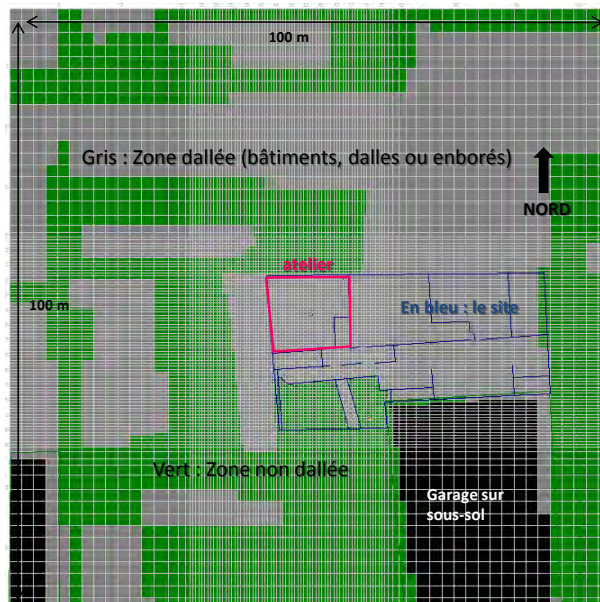
Le site atelier a été exploité pour une activité de traitement de surface chimique et par électrolyse, de 1952 à 2005. Il s'agissait d'une ICPE (installation classée pour la protection de l'environnement) soumise à autorisation. Les études environnementales ont mis en évidence une pollution des sols par les métaux, du tétrachloroéthylène (PCE) et dans une moindre mesure du trichloroéthylène (TCE), au droit du site. La source de PCE et TCE sous forme de phase organique est présente dans la zone non saturée et dans la zone saturée sous une partie (Sud-ouest) de l'atelier et en extérieur (voir Figure 1).

Les données historiques et les diagnostics disponibles mettent en évidence la présence de solvants chlorés principalement dans l'angle Sud-Ouest de l'atelier de traitement de surface, ainsi qu'au Sud de cet atelier (auvent attenant à l'atelier et cour intérieure). L'auvent se compose d'une toiture, d'un mur commun au nord avec l'atelier et d'une façade au sud constituée d'un muret de 1 m de hauteur surmonté par des fenêtres détériorées. Le local dans lequel les mesures de concentrations dans l'air intérieur ont été conduites est visualisé sur la Figure 1. Il s'agit de l'ancien atelier de traitement de surface dans la zone nord-ouest du bâtiment. Sont présentées également en Figure 1 les zones environnant l'atelier dallées ou non dallées.

Le site atelier du projet TEMPAIR a été équipé dans le cadre du projet FLUXOBAT au cours duquel des mesures ont été réalisées. Elles sont présentées dans les annexes du guide méthodologique FLUXOBAT (Traverse et al. 2013).



Localisation en zone urbaine



Revêtements aux alentours du site (source : FLUXOBAT)

FIGURE 1 - LE SITE ATELIER

## Géologie

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

- remblais hétérogènes sur environ 0.5 à 1 m d'épaisseur, constitués de sables et graviers dans l'atelier central et la cour, et de sables limoneux dans l'atelier de traitement ;
- limons bruns jusqu'à environ 2.5 à 3 m, qui deviennent sableux avec la profondeur, le sable devenant majoritaire sur certains sondages ;
- sables, graviers, galets, jusqu'à environ 20 mètres de profondeur.

### 1.2.1.2 Réseau de points de mesure

Le site atelier a été équipé dans le cadre du projet FLUXOBAT d'ouvrages permanents permettant de capter les gaz du sol (piezairs) et d'ouvrages permettant de capter la nappe alluviale (piézomètres). L'ensemble de ces ouvrages sont représentés sur la figure ci-dessous.

La majorité des ouvrages sont situés sous la dalle du bâtiment, seuls 4 ouvrages sont situés au niveau de la source en limite extérieure du bâtiment (pza39-42) et 3 ouvrages dans le panache gazeux (pza2 puis pza3 et pza4). Les profondeurs crépinées de ces ouvrages sont présentées sur la figure ci-dessous. Chaque formation captée sera désignée comme suit : R pour remblais, LH pour limons hauts, LB pour limons bas et S pour les sables et graviers.

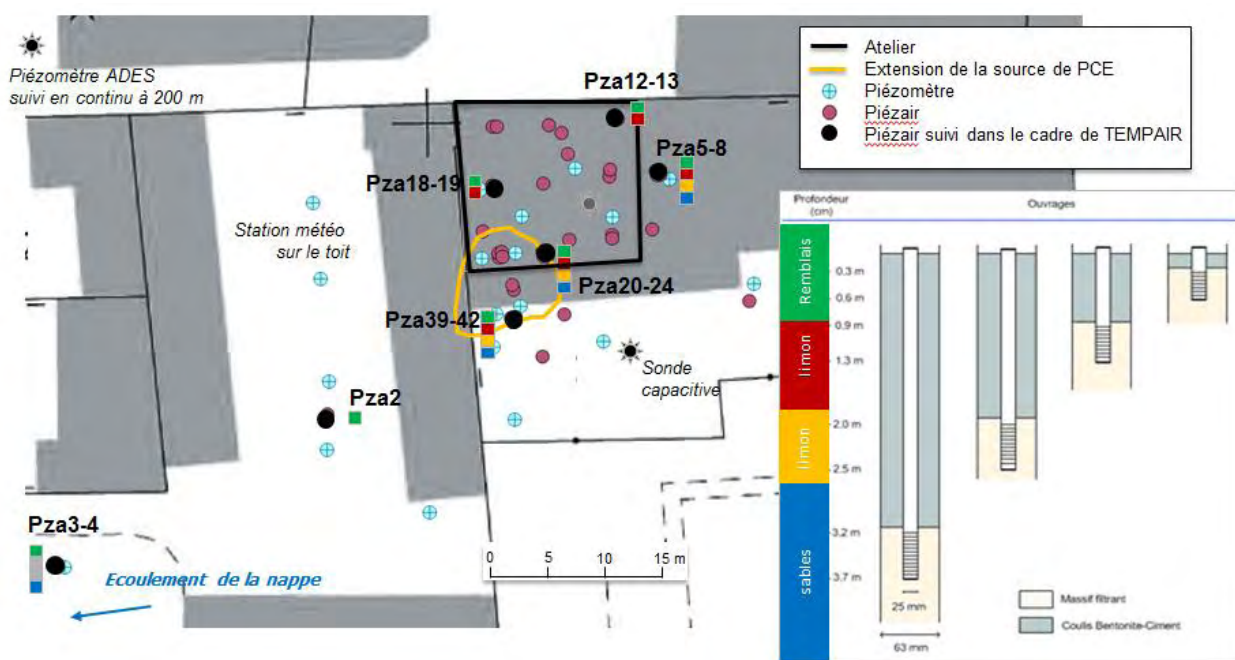
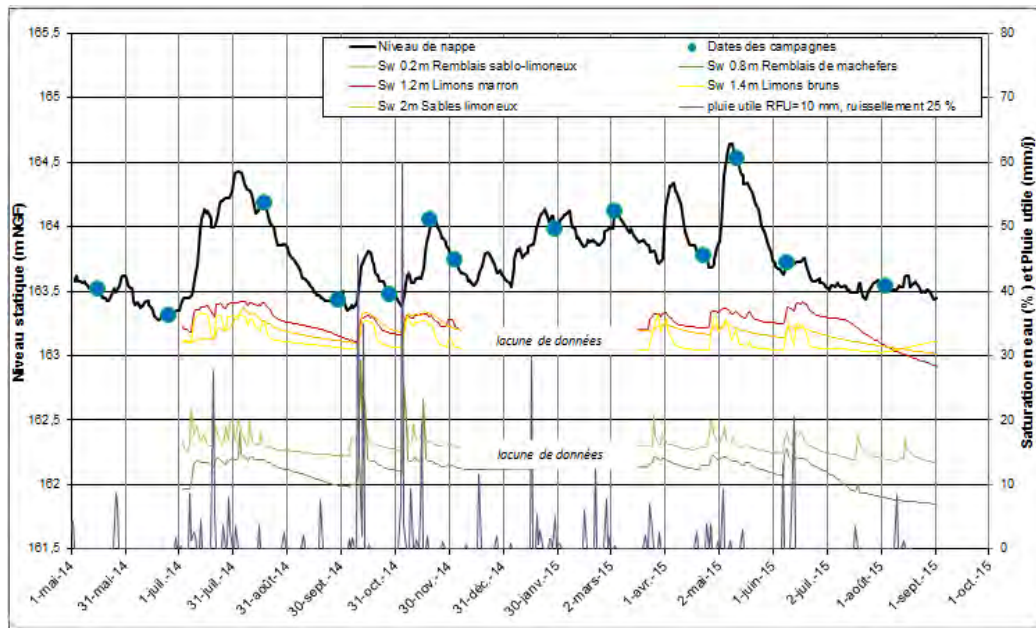


FIGURE 2 - RESEAU DE PIEZAIRS (PZA) SUIVIS ET ATELIER DANS LEQUEL LES CONCENTRATIONS DANS L'AIR ONT ETE SUIVIES

### 1.2.1.3 Piézométrie

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

Les ouvrages piézométriques utilisés pour le suivi du niveau de nappe sur site sont représentés en Figure 2. Dix campagnes synchrones ont été réalisées entre juin 2014 et juin 2015. Parallèlement les enregistrements journaliers du piézomètre suivi dans le cadre du réseau ADES et situé à 100 mètres en aval du site ont été recueillis. La chronique piézométrique sur cet ouvrage et les mesures ponctuelles lors des campagnes sur site sont représentées sur la Figure 3.



**FIGURE 3 - CHRONIQUE PIEZOMETRIQUE ET DATES DES CAMPAGNES DE MESURES DANS LES GAZ DU SOL**

Le gradient hydraulique est très faible au droit du site, avec plusieurs valeurs de niveau d'eau incohérentes. Il a été observé localement en aval hydraulique du site un dôme piézométrique induit par une possible ré-infiltration localisée des eaux météoriques au droit des garages. A plus grande échelle, le gradient hydraulique est d'environ 0,1%. Les niveaux de nappe varient sur l'année d'une amplitude de l'ordre de 0,7 m sur le site (mesures discrètes) et de 1,4 m sur l'ouvrage ADES suivi en aval (suivi journalier). Les niveaux les plus hauts ont été mesurés en mai 2015.

Il est à noter enfin qu'en dehors du bâtiment du site atelier, dans le jardin et dans la zone de garage à l'ouest (voir Figure 1), les terrains ne sont pas imperméabilisés permettant ainsi l'infiltration des eaux de pluie.

### 1.2.2 Campagnes de mesures

Afin d'identifier le rôle des variables météorologiques et du chauffage sur la variabilité des concentrations dans l'air intérieur et dans les gaz du sol, le projet repose sur l'acquisition et l'interprétation de plusieurs campagnes de mesures sur le site.

#### Air intérieur

La variabilité temporelle des concentrations dans l'air intérieur a été étudiée par des suivis en continu des concentrations dans l'atelier lors de différentes périodes. Les mesures de concentration ont été réalisées à l'aide d'un PID (voir § 1.2.3) ayant une limite de détection de 1 ppb positionné au centre de l'atelier à 50 cm au-dessus du sol. Les campagnes de mesure sur lesquelles porte l'analyse des facteurs d'influence sont les suivantes :

- Campagne 1<sup>3</sup>, du 21 mai au 30 mai 2014,
- Campagne 2<sup>4</sup>, du 20 novembre au 3 décembre 2014,
- Campagne 3 (notée 3-a), du 23 mars au 1er avril 2015,
- Campagne 4, du 5 au 11 août 2015.

Lors des campagnes 2 et 3, l'atelier était chauffé à l'aide de convecteurs soufflants, conduisant à une relative stabilité de la température intérieure à la différence de la campagne de fin de printemps 2014 (campagne 1) et d'été 2015 (campagne 4).

<sup>3</sup> subdivisée pour l'interprétation en deux sous périodes

<sup>4</sup> subdivisée pour l'interprétation en deux sous périodes

Les mesures de concentrations ont été conduites sur un pas de temps de 10 minutes, une moyenne horaire a été établie ensuite pour faciliter les interprétations statistiques.

### Gaz du sol

Dans cette matrice, les données interprétées sont issues :

- d'une part de mesures ponctuelles : entre mai 2014 et août 2015, 13 campagnes de mesures de concentration en PCE dans 19 piezaires sous bâtiment ou en dehors de celui-ci jusqu'à une trentaine de mètres de la source ont été conduites. Les piezaires crépinés sur une hauteur de l'ordre de 30 à 50 cm permettent de prélever les gaz dans les différents horizons lithologiques en présence : dans les remblais (0-1 m), les limons (1 à 2,5 m) ou les sables sous-jacents (allant au-delà de la surface piézométrique de la nappe située vers 5 m de profondeur) ;
- d'autre part, sur quatre périodes de 3 à 6 jours des mesures en continu des concentrations à l'aide d'un PID avec un pas de temps d'enregistrement de 10 minutes. Les différents ouvrages ayant été suivis captent les remblais et/ou les limons.

Les interprétations ont été réalisées à l'aide de différentes approches statistiques : facteurs de corrélation  $r^2$  de Pearson pour les gaz du sol et l'air intérieur permettant l'identification de corrélations entre deux variables indépendamment des autres et indépendamment du temps, puis ACP (*analyse en composantes principales*) permettant l'identification de corrélations entre plus de deux variables indépendamment du temps et *analyse des séries temporelles* pour l'air intérieur permettant l'identification de corrélations des évolutions dans le temps de variables prises deux à deux.

### 1.2.3 Analyseur PID utilisé

Lors des travaux menés dans le cadre du projet FLUXOBAT, la prédominance du perchloroéthylène (PCE) dans les gaz du sol avait été mise en évidence. Les mesures réalisées dans le cadre du projet TEMPAIR ont confirmé ce constat. Ainsi, des analyseurs de type PID (détecteur par photo-ionisation) ont été utilisés pour mesurer les variations de concentrations gazeuses. L'utilisation de cet analyseur pour la détermination d'une concentration équivalente en PCE ( $PCE_{eq}$ ) est adaptée au contexte particulier d'une pollution de composition simple, elle ne saurait l'être en présence d'un mélange hétérogène dans le temps ou dans l'espace. Afin de pouvoir comparer les mesures, une calibration de l'appareil est réalisée à chaque campagne (à savoir l'étalonnage au gaz étalon qu'est l'isobutylène et la réalisation du zéro). Dans les gammes de concentrations rencontrées, l'incertitude de mesure est de 10%.

Afin de vérifier la pertinence de l'utilisation du PID, lors de 6 campagnes, 36 mesures de concentration en PCE sur charbon actifs (SKC 100 mg) ont été réalisées sur 18 piezaires en parallèle de la mesure avec le PID, les analyses ont été réalisées par le laboratoire AGROLAB. Lors de ces mesures, l'humidité relative des gaz du sol était supérieure à 92% et la température comprise entre 6 et 25°C. Les écarts entre les concentrations mesurées par GC-MS après accumulation sur charbon actif et les mesures en équivalent PID sont présentés sur la figure suivante.

Considérant l'ensemble des mesures, la courbe de régression est :  $C_{CA}=0,7.C_{eqPID}$  ( $r^2=0,84$ ), la concentration mesurée au laboratoire étant 30% inférieure à celle mesurée avec le PID. En ne considérant que les mesures inférieures à  $750 \text{ mg/m}^3$  permettant de rendre compte de la majorité des observations (89% des mesures), les concentrations mesurées sur charbon actif sont inférieures de 15% à celles mesurées sur site au PID, la courbe de régression est  $C_{CA}=0,85.C_{eqPID}$  ( $r^2=0,93$ ).

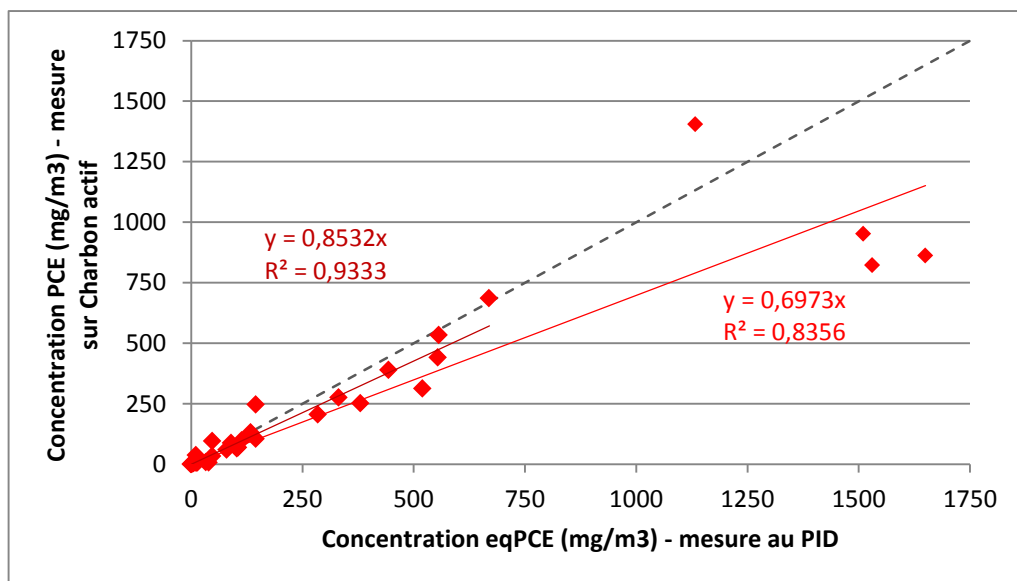


FIGURE 4 - COMPARAISON DES CONCENTRATIONS EN PCE DANS LES GAZ DU SOL MESUREES AU LABORATOIRE PAR ANALYSE CHIMIQUE GC-MS OU SUR SITE AU PID

#### 1.2.4 Modélisation numérique du panache gazeux

Afin de mieux appréhender la variabilité temporelle observée des concentrations dans les gaz du sol, une modélisation en régime transitoire des concentrations dans les gaz du sol et des flux vers l'atmosphère a été conduite.

L'objectif de la modélisation numérique 2D verticale est d'estimer l'impact de la pluie (et des variations de niveau de nappe résultantes) ainsi que les variations de pression atmosphérique sur le panache de pollution gazeuse dans le sol. La géométrie du modèle est définie à partir de la configuration du site atelier (200 m de long, 7,2 m de hauteur et une dalle de 100 m sur une partie de la surface). A partir de cette géométrie, plusieurs simulations ont été conduites afin d'évaluer l'impact des différents facteurs. Le modèle a été construit avec le logiciel SIMUSCOPP<sup>5</sup>, logiciel qui permet de simuler des écoulements diphasiques eau – air dans la zone non saturée.

Après une période de modélisation simulant l'établissement d'un panache stabilisé (sans pluie), les simulations en régime transitoire s'étendent sur une année, du 17 avril 2014 au 30 juin 2015. En raison de contraintes numériques, le pas de temps des variations des conditions météorologiques est de 2 jours. La schématisation du modèle est présentée ci-dessous.

<sup>5</sup> Logiciel propriétaire co-développé par IFP, ENI et BURGEAP.

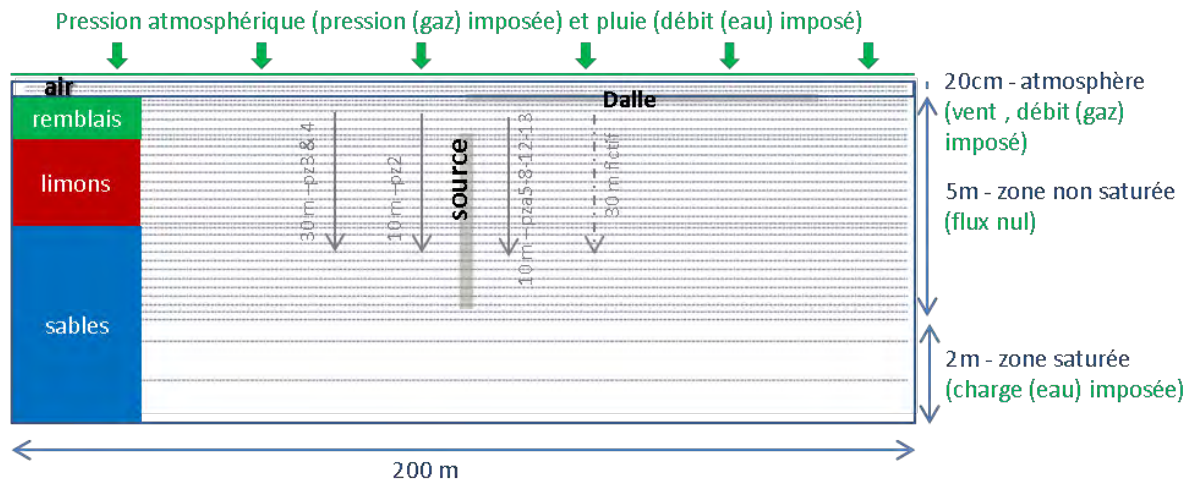


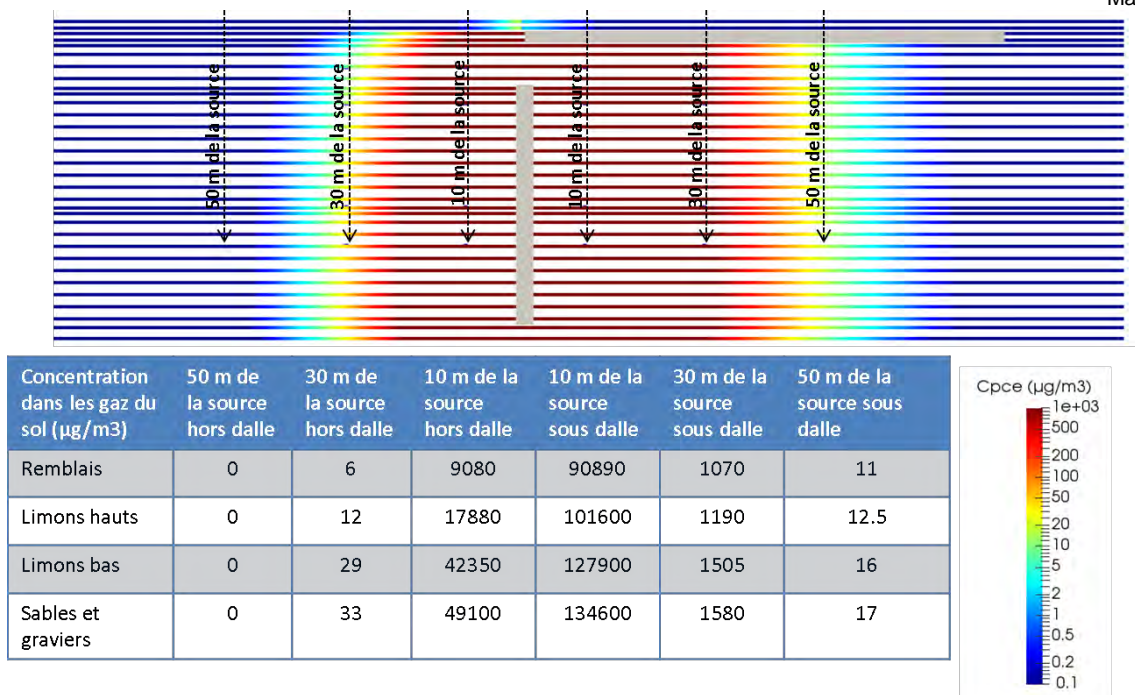
FIGURE 5 - SCHEMATISATION DU MODELE NUMERIQUE

La majorité des paramètres de terrain correspondent à ceux présentés dans le guide FLUXOBAT (Traverse et al. 2013). Pour la dalle, deux hypothèses sont retenues quant à sa perméabilité :

- $K_{\text{dalle}} \text{ forte} = 2.10^{-12} \text{ m}^2$  : valeur comprise entre une dalle de « bonne » qualité ( $2.10^{-13} \text{ m}^2$ ) et une dalle de « moyenne » qualité ( $2.10^{-11} \text{ m}^2$ ) selon Bakker et al. (2008) correspondant à ce qui a été mesuré dans le cadre du projet FLUXOBAT (Traverse et al. 2013) ;
- $K_{\text{dalle}} \text{ faible} = 2.10^{-16} \text{ m}^2$  : valeur correspondant à une dalle de « très bonne » qualité selon Bakker et al. (2008) qui qualifie comme telle une dalle de perméabilité de  $2.10^{-15} \text{ m}^2$ .

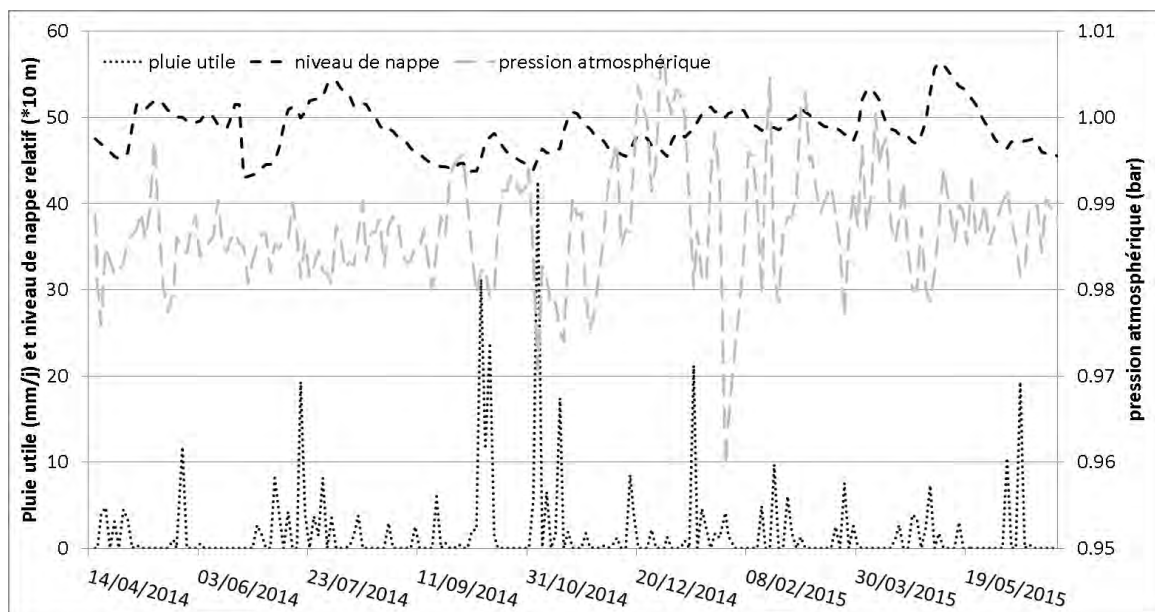
La source de pollution considérée est représentée par une phase organique (NAPL) composée uniquement de PCE dans la zone non saturée. La source s'étend sur une largeur de 3 m au centre du domaine et, en vertical de 0.9 m de profondeur (base des remblais) à 4.9 m de profondeur (dans la frange capillaire). Le NAPL est immobile, sa saturation est homogène et égale à 1%. Mentionnons que sur la durée de simulation (environ 1 an), l'évolution de cette saturation est très faible. Le PCE qui compose la source se volatilise (échange NAPL – gaz) et se dissout (échange NAPL – eau). Les échanges NAPL – gaz sont modélisés avec un facteur cinétique (atténuation des concentrations d'équilibre à la source) de 1%<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> paramètre issu de la caractérisation de la source du site atelier, cf. annexe 8 du guide FLUXOBAT (Traverse et al, 2013)



**FIGURE 6 – PANACHE DE CONCENTRATIONS EN PCE MODELISE EN REGIME PERMANENT DANS LA ZONE NON SATURÉE**

Les variations temporelles des facteurs d'influence mesurés et introduits dans le modèle sont présentées sur la figure ci-dessous. Les variations de concentrations en PCE dans les gaz du sol durant une année de régime transitoire sont étudiées en 4 points d'observation : à 30m et 10m de la source hors dalle et à 30m et 10m de la source sous dalle. A ces distances, les évolutions de concentrations ont été analysées aux profondeurs des mesures (remblais à 0,5 m ; limons hauts à 1,1 m ; limons bas à 2,9 m et sables à 3,3m).



**FIGURE 7 : VARIATION TEMPORELLE DES FACTEURS D'INFLUENCE MODELISES<sup>7</sup>**

<sup>7</sup> Le niveau de nappe relatif correspond au niveau de nappe par rapport à un niveau de référence qui est ici fixé arbitrairement à 50 m. Les variations du niveau d'eau sont amplifiées d'un facteur 10 sur le graphique afin de rendre ces variations visibles. Ainsi lorsque la nappe passe de 50m (niveau de référence) à 40 m sur ce graphique, cela correspond à une variation de 1m du niveau en réalité (le niveau de nappe passe de 5 m de profondeur à 6 m de profondeur).

## 2. Gaz du sol - Facteurs influençant la variabilité temporelle des concentrations

### 2.1 Analyse globale

Ce paragraphe présente de manière synthétique les variations de concentrations observées ou modélisées ainsi que l'influence théorique des variables suivies. Ces résultats et interprétations sont ensuite détaillés dans les paragraphes 2.2 à 2.5 reprenant chacune des variables que sont la pluie, la température, le vent, la pression atmosphérique et les niveaux de nappe.

*Avertissement : Il est important de garder en mémoire que les résultats des mesures et des simulations présentés ci-dessous sont très dépendants du site : ici le rôle des limons en position centrale du profil lithologique est déterminant pour les écoulements dans la zone non saturée et in fine pour les variations des concentrations puisqu'ils limitent les transferts verticaux entre les sables et la surface du sol. Avec d'autres successions de lithologies mais également avec une source localisée différemment et des caractéristiques de dalle différentes, les écoulements de gaz et les variations induites de concentrations en COV pourraient être très différents.*

#### 2.1.1 Préambule

La littérature et les guides français traitant de la mesure des concentrations dans les gaz du sol [FLUXOBAT (2013), ATTENA (2013), ADEME (2013a), BRGM-INERIS (2016)] mettent en exergue la forte variabilité temporelle des concentrations. Cette variabilité est induite par les conditions météorologiques et hydrologiques qui influencent les transferts de polluants et donc généralement les concentrations à trois échelles de temps :

1. Tout d'abord l'effet immédiat associé à une variation de pression (pluie, vent, pression atmosphérique, niveau de nappe) ;
2. Puis le rééquilibrage des pressions dans la zone non saturée, conduisant à des écoulements gazeux (et donc à des variations de concentrations en polluants) durant plusieurs jours ;
3. Enfin, une échelle de temps plus longue au cours de laquelle le transport diffusif peut être modifié suite aux évolutions des gradients de concentration (induits soit par les variables énoncées précédemment, soit par des modifications de température) et/ou des coefficients de diffusion effectifs (induits soit par des variations de saturation en eau des terrains, soit par des modifications de température).

Ainsi, la variation des concentrations en COV dans les gaz du sol peut être étudiée :

- au niveau horaire (effet immédiat associé à une variation de pression),
- au niveau journalier, liée au cycle diurne/nocturne (associé aux variations entre le jour et la nuit des conditions météorologiques),
- au niveau pluri-journalier (liée au rééquilibrage des pressions),
- au niveau inter-saisonnier (associée à des variations de transport diffusif liées par exemple à la température ou la pluie ou de transport convectif liées aux variations de perméabilité ou de pression dont par exemple une dépression créée par un bâtiment chauffé).

D'un point de vue théorique, les écoulements transitoires de gaz dans la zone non saturée sont associés aux phénomènes météorologiques suivants<sup>8</sup> :

- lors de *l'infiltration de la pluie*, le volume d'eau infiltré conduit à chasser un volume d'air équivalent vers l'atmosphère, augmentant ainsi le flux gazeux vers l'atmosphère (et donc une augmentation des concentrations dans les gaz du sol à faible profondeur du fait des écoulements induits). Les cheminements préférentiels vers l'atmosphère dépendent des variations spatiales de la saturation

<sup>8</sup> Rappelons que localement les flux dans la zone non saturée et à l'interface avec l'atmosphère ou le bâtiment dépendent de la perméabilité des terrains et de l'interface entre le sol et l'atmosphère



en eau (nécessitant de distinguer les zones où la pluie s'infiltré ou non), de la perméabilité des terrains et du recouvrement du sol ;

- une augmentation du niveau de nappe induit également une remontée des gaz du sol vers l'atmosphère, et inversement lorsque le niveau de nappe baisse, une quantité équivalente d'air entre dans la zone non saturée depuis l'atmosphère. En présence de concentrations plus élevées dans la zone non saturée en profondeur, la remontée du niveau de la nappe conduit à augmenter le transport vertical des pollutions et ainsi augmenter les concentrations dans la zone non saturée ;
- les variations de pression atmosphérique induisent également des écoulements gazeux. Une baisse de la pression atmosphérique induit une augmentation du flux gazeux vers l'atmosphère. L'équilibrage des pressions dans la zone non saturée conduit à une sortie de l'air de la zone non saturée vers l'atmosphère. Celle-ci est associée à une remontée de la nappe permettant d'équilibrer le volume d'air sorti par un volume d'eau supplémentaire en base du système (sur le site atelier, une baisse de pression atmosphérique de 33 hPa a conduit à une remontée de nappe de 10 cm). Inversement, une augmentation de la pression atmosphérique a l'effet inverse (entrée d'air depuis la surface et baisse du niveau de nappe).
- le vent d'intensité élevé peut conduire à des surpressions en amont de zones bâties et des dépressions en aval venant modifier les écoulements dans les gaz du sol à faible profondeur. Une surpression au niveau du sol conduit à une entrée d'air atmosphérique et inversement.

Enfin, la température a une influence sur la volatilité des COV (ici du PCE) et sur leur coefficient de diffusion dans les gaz. Si cela n'induit pas d'écoulement de gaz, ces variations conduisent à modifier la diffusion de la pollution dans la zone non saturée et donc les concentrations en COV (une température plus élevée du sol amène des concentrations en COV plus élevées dans les gaz du sol).

Il est à noter que le gradient thermique entre les gaz du sol et l'air intérieur ou atmosphérique peut également générer un gradient de pression pouvant occasionner un écoulement spécifique d'air et donc de pollution. Ce dernier point s'il est abordé dans le présent rapport n'a pas fait l'objet de travaux spécifiques dans le cadre du projet TEMPAIR.

## 2.1.2 Variabilité globale mesurée

### Variations spatiales

Sous la dalle du bâtiment de 160 m<sup>2</sup>, mentionnons la forte variabilité spatiale (en plan) des concentrations en PCE qui, en fonction des campagnes, est compris entre un facteur 20 et un facteur 5000, ce maximum étant mesuré dans la partie basse des limons. En moyenne pour l'ensemble des campagnes, au sein de chaque horizon, la variabilité spatiale est de 2 ordres de grandeur dans les remblais, dans la partie haute des limons et dans les sables et atteint 3 ordres de grandeur dans la partie basse des limons.

La variabilité verticale est également mise en évidence avec des écarts de concentrations entre les différentes lithologies en moyenne d'1 à 2 ordres de grandeur. Ces écarts sont pour certaines campagnes uniquement d'un facteur 2 mais ont pu atteindre sur le quadruplet proche de la source un facteur 1400.

### Variations pluri-journalières et diurnes

Les concentrations dans les gaz du sol ont été mesurées en continu pendant 3 campagnes de 3 à 6 jours. Les variations de concentrations sont pour deux campagnes inférieures à un facteur 2 et pour une campagne d'un facteur proche de 10. Les variations les plus significatives (augmentation) sont associées à des phénomènes de pluie modérée (inférieure à 20 mm), voire pour l'amplitude la plus importante à un effet combiné du vent et de la pluie.

Les mesures réalisées lors de la campagne de juillet 2015 sont celles présentant le plus distinctement les variations de concentration sur des cycles jour/nuit traduisant l'effet des conditions nocturnes (vent faible, gradient thermique intérieur-extérieur plus élevé). Lors des autres campagnes, ces variations sont masquées par les variations induites par d'autres phénomènes. Dans l'ensemble il faut noter que ces variations jour/nuit sont faibles, inférieures à 10% avec :

- une augmentation des concentrations à partir de la fin de journée (20h à 22h) jusqu'au matin ;
- une diminution à partir du matin (6h à 10h) durant la journée.

### Variations saisonnières

Entre mai 2014 et août 2015, 13 campagnes de mesures ponctuelles de concentration en PCE<sub>eq</sub> dans 19 piezaires ont été conduites. Ce suivi montre des variations temporelles de concentration sur l'ensemble des profondeurs quelle que soit la distance à la source (dans la source et jusqu'à 30 mètres de celle-ci).

Globalement, l'amplitude des variations temporelles est plus importante dans les limons (facteur 6 à 300), puis dans les sables (facteur 18 à 190) et enfin dans les remblais (facteur 11 à 25).

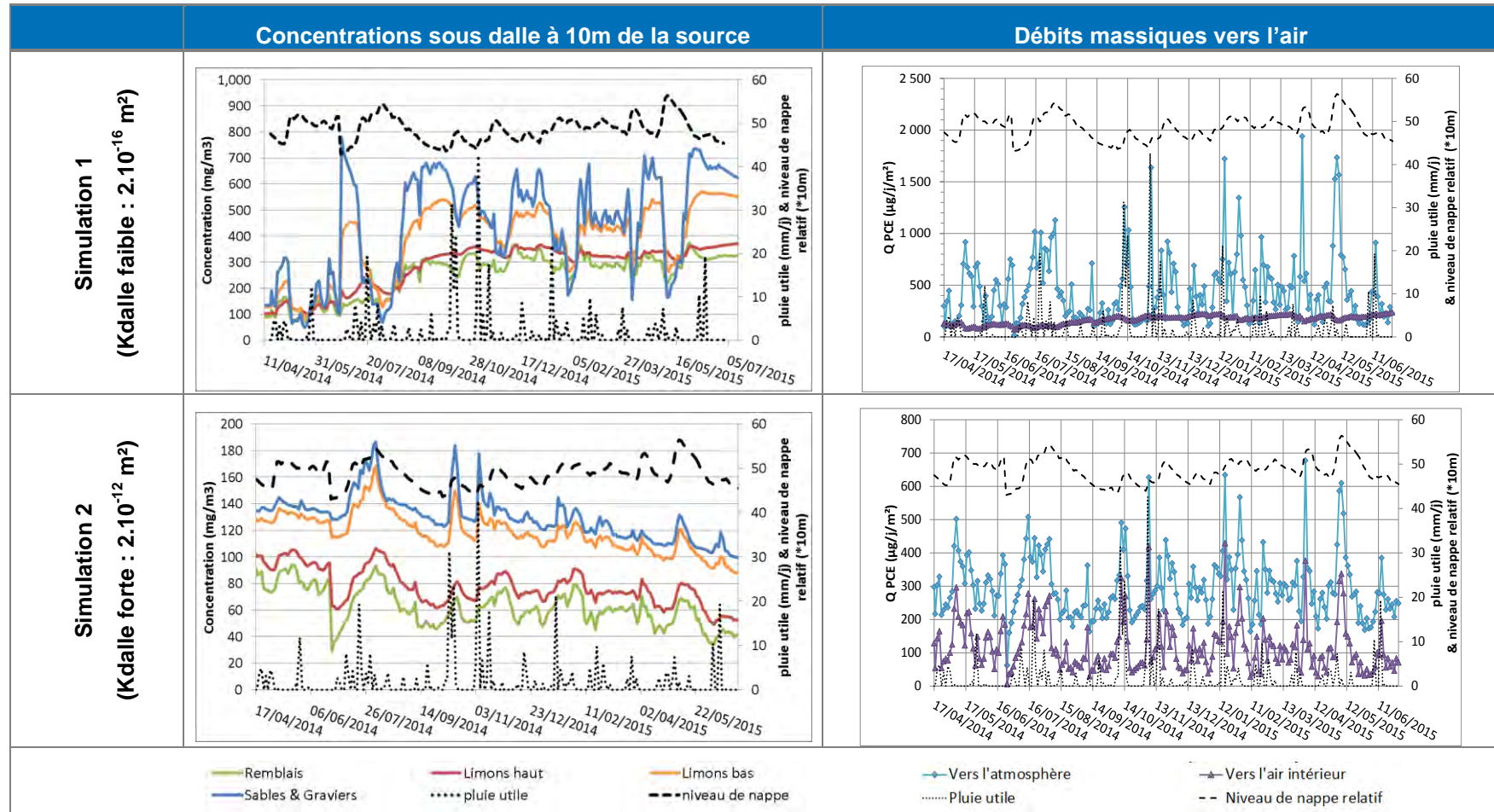
A 30 mètres de la source dans une zone où les sols sont à nu, les concentrations varient encore significativement dans les sables (de 0 à 75 mg/m<sup>3</sup> en PCE<sub>eq</sub>) et dans les remblais (de 0 à 26 mg/m<sup>3</sup> en PCE<sub>eq</sub>). Plusieurs auteurs mentionnent que généralement l'impact dans l'air intérieur d'un panache de pollution en nappe ne s'étend que rarement au-delà de 30 mètres de la limite du panache (Lowel et Eklund, 2004, Folkes et al 2009, 2007). Cependant, ces publications reposent sur des situations où seule la nappe est impactée par une pollution dissoute. Ces résultats ne peuvent donc pas être appliqués à des situations où la source se situe dans la zone non saturée du sol.

### 2.1.3 Variabilité globale modélisée

La modélisation des évolutions temporelles des concentrations et de débits massiques a été conduite pour le site atelier du projet avec deux hypothèses quant à la perméabilité de la dalle (voir § 1.2.4). Les résultats de deux simulations numériques en régime transitoire sur une année intégrant les historiques de pluie, du niveau de nappe et de pression atmosphérique (Figure 8) mettent également en évidence une variabilité temporelle des concentrations et des débits massiques :

- lorsque la dalle est peu perméable ( $K=2.10^{-16} \text{ m}^2$ ),
  - à 10m de la source les variations de concentrations sont marquées dans tous les horizons, avec des variations d'un facteur 40 au maximum. Elles sont cependant inférieures à celles observées sur les piezaires situés à cette distance (facteur 10 à 100 dans les remblais et les limons et 30 dans les sables). L'écart entre les simulations et les mesures peut être lié à la non prise en compte des variations du vent et de la température mais également au pas de temps des simulations (2 jours) conduisant à moyenner les effets ;
  - au cours de l'année de simulation, les concentrations augmentent sous la dalle, indiquant une accumulation lente de PCE. Ce résultat est interprété comme la conséquence d'un impact à long terme des variations de conditions météorologiques (en particulier la pluie et la pression atmosphérique) accentué par la faible perméabilité de la dalle qui limite les échanges avec l'atmosphère ;
  - les débits massiques vers l'air intérieur présentent des variations faibles liées à la perméabilité de la dalle ici choisie conduisant à confiner les effets sous dalle ;
  - les débits massiques vers l'air atmosphérique présentent des variations significatives d'un ordre de grandeur.
- lorsque la dalle est perméable ( $K=2.10^{-12} \text{ m}^2$ ) :
  - les variations de concentrations sont beaucoup moins marquées, les variations maximum étant d'un facteur 2 à 7 ;
  - les concentrations sous dalle n'augmentent pas dans le temps, la dalle perméable permet un équilibrage rapide des pressions avec l'air intérieur ;
  - les débits massiques vers l'air intérieur présentent des variations significatives induites par cet équilibrage, elles peuvent atteindre un ordre de grandeur ;
  - les débits massiques vers l'air atmosphérique présentent des variations plus faibles.

Les effets des facteurs d'influence (pluie, variation de niveau de nappe, pression atmosphérique) sont difficiles à interpréter du fait de leurs effets couplés. Ainsi les différents facteurs d'influence sont étudiés un par un dans les paragraphes suivants.



**FIGURE 8 - CHRONIQUES DE CONCENTRATIONS ET DEBITS MASSIQUES EN PCE MODELISEES SUR UNE ANNEE EN FONCTION DES VARIATIONS DE LA PLUIE, DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE ET DU NIVEAU DE NAPPE**

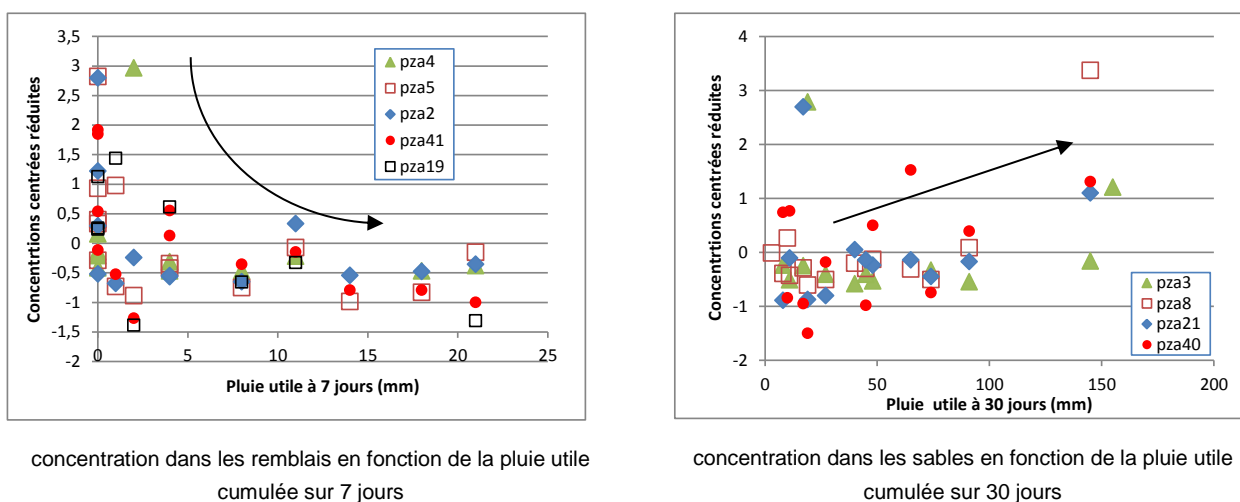
## 2.2 La pluie et la saturation en eau des terrains

Plusieurs auteurs ont montré l'influence de la pluie sur les modifications de concentrations en COV (PCE, TCE) dans les gaz du sol en lien avec la pluie [Shen et al (2012), Tillman et al. (2009), Yu et al. (2009), Wang et al (2012), SERDP (2014)]. Ces études reposent en grande partie sur des travaux de modélisation avec une source présente dans la nappe et font ressortir des évolutions de concentrations faisant se succéder plusieurs phases associées à l'infiltration d'eau.

Les concentrations en  $PCE_{eq}$  mesurées sur les piézais lors des différentes campagnes du projet TEMPAIR ont été comparées à la pluie utile cumulée le jour des mesures, sur 2 jours, 7 jours, 15 jours, 22 jours et 30 jours (incluant le jour de mesure).

La Figure 9 présente les concentrations centrées réduites en fonction de la pluie utile pour une sélection d'ouvrages où une corrélation se dessine. Mentionnons d'abord une forte variabilité des concentrations pour les pluies nulles ou faibles (inférieures à 3 mm sur 7 jours ou inférieures à 20 mm sur 30 jours) correspondant à une part significative des mesures.

La partie gauche de la figure montre une corrélation négative entre les concentrations dans les remblais et la pluie cumulée sur 7 jours ( $r^2$  max de 0,4). La partie droite de la figure montre une corrélation positive entre les concentrations dans les sables et la pluie utile cumulée sur 30 jours ( $r^2$  max de 0,6).



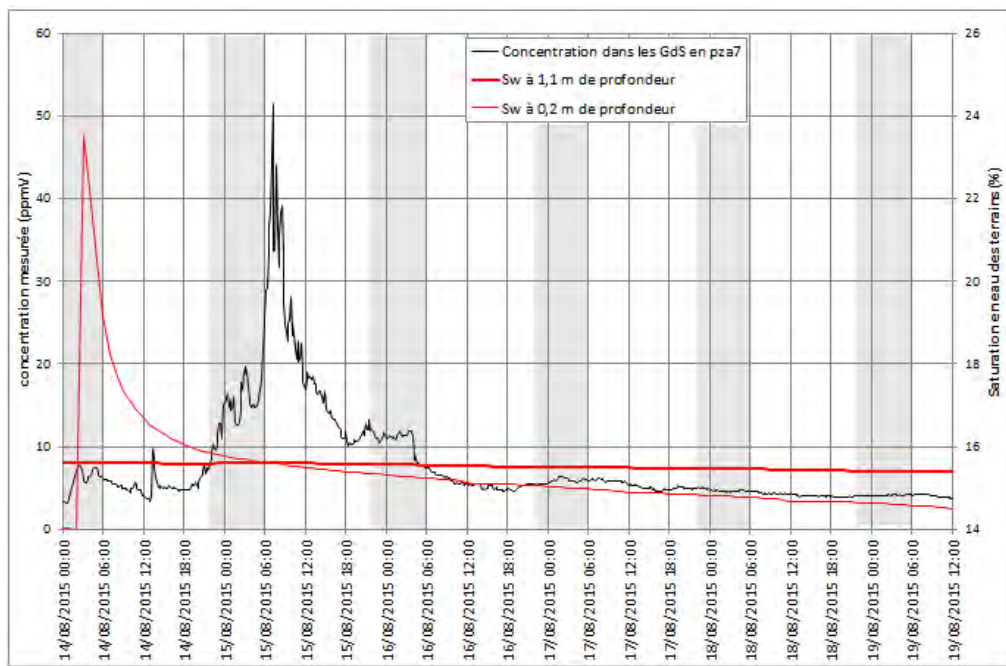
**FIGURE 9 - CORRELATION DES CONCENTRATIONS EN PCEEQ DANS LES GAZ DU SOL AVEC LA PLUIE UTILE**

L'analyse des mesures ponctuelles de concentration dans les gaz du sol en lien avec les cumuls de pluie précédant la mesure tendant à suggérer un double effet : d'une part, à moyen terme (cumul sur 7 jours), il semble que les pluies les plus élevées conduisent à une diminution des concentrations tandis qu'à plus long terme (22 à 30 jours), l'effet de la pluie induit plutôt une augmentation des concentrations. Cette interprétation, conduite sans considération de l'influence des autres variables, semble cohérente avec les observations / modélisations conduites par certains auteurs (Shen et al, 2012 et SERDP, 2014) qui mettent en avant trois évolutions successives des concentrations dans les gaz du sol (pour une source en nappe) suite à un épisode pluvieux :

- Phase 1 : une augmentation immédiate des concentrations dans les gaz du sol associée à l'épisode d'infiltration de l'eau de pluie (laquelle conduit à la remontée des gaz plus concentrés en profondeur vers la surface) ;
- Phase 2 : une phase de décroissance des concentrations dans les gaz du sol correspondant à l'introduction d'eau non polluée dans le milieu souterrain, cette phase peut durer plusieurs jours après la pluie ;
- Phase 3 : une phase nettement plus longue de rééquilibrage des pressions pouvant conduire à une tendance à l'augmentation des concentrations.

Les comparaisons des concentrations sur le site atelier du projet TEMPAIR au cumul des pluies utiles sur 7 jours et 22 ou 30 jours pourraient être associées aux phases 2 et 3 évoquées ci-dessus, également mises en évidence par la modélisation conduite pour une dalle peu perméable.

Par ailleurs, deux campagnes ont permis de mettre en évidence l'effet immédiat de l'infiltration de la pluie (juin et août 2015) sur l'augmentation des concentrations dans les gaz du sol (phase 1 évoquée ci-avant). Les mesures réalisées montrent, sur ces ouvrages, une augmentation des concentrations après la pluie dans un délai de 1h à 16h dans les limons et de 1h à 60h dans les remblais. L'augmentation observée n'est cependant que de courte durée (inférieure à 48 heures) à l'image de l'évolution de la saturation en eau du premier horizon de sol. La figure suivante illustre cette variation.

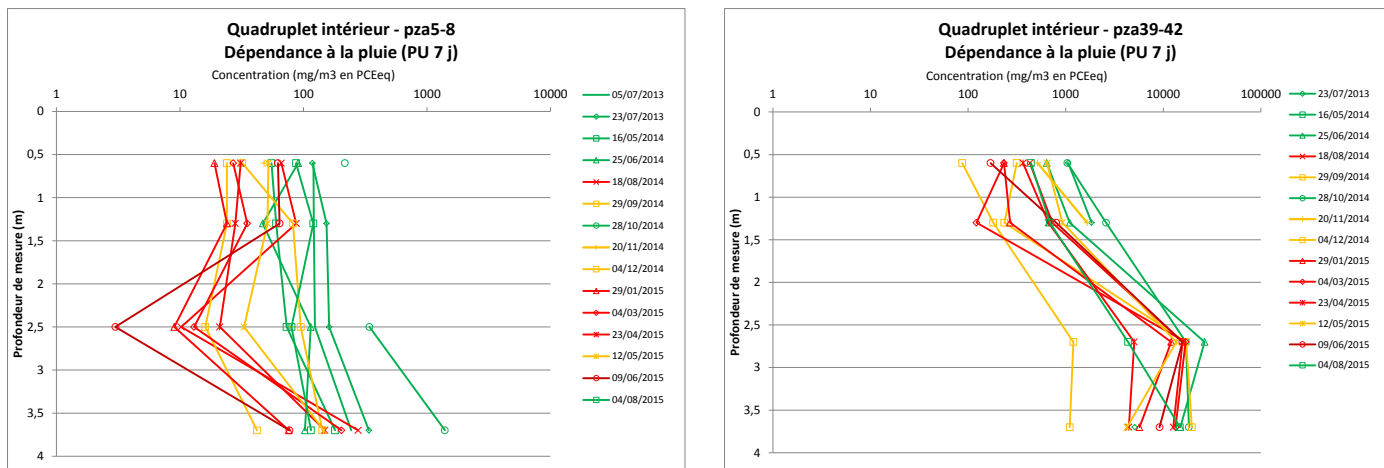


**FIGURE 10 – SUIVI DES CONCENTRATIONS EN PCEEQ DANS LES GAZ DU SOL ET DE LA SATURATION EN EAU DES SOLS**

L'augmentation des concentrations est associée ainsi à un transport de polluant par convection (écoulement associé à la surpression créée par l'apport d'eau) plus qu'à un transport par diffusion (associé aux gradients de concentration). Le fait que la pluie en dehors du bâtiment conduit à une augmentation des concentrations dans les remblais et les limons bas sous la dalle est cohérent avec le positionnement de la source de la pollution partiellement sous la dalle. En effet, la pluie conduit à un phénomène de déplacement des gaz du sol vers l'atmosphère et les horizons moins saturés en eau (sous la dalle) ainsi qu'à une remontée des gaz des horizons les plus profonds (sables) vers la surface en passant préférentiellement par les terrains situés sous la dalle lors que celle-ci est perméable.

Notons que l'amplitude de l'augmentation mesurée est cependant relativement modérée : les augmentations sont pour deux campagnes inférieures à un facteur 2 et pour l'une d'entre proche d'un facteur 10. Les augmentations mesurées sont associées à des phénomènes de pluie modérée (inférieure à 20 mm), et pour l'amplitude la plus importante à un effet combiné du vent et de la pluie.

La relation inverse entre les concentrations et la pluie utile cumulée à 7 jours est également visible sur les profils de concentration mesurés dans le panache en pza5 à 8 (Figure 11). Cela est nettement visible dans les remblais et les limons mais pas dans les sables. Dans la source hors bâtiment (pza39-42, Figure 11) l'influence de la pluie n'est visible que dans les remblais et la partie haute des limons.



Coloration de la pluie cumulée les 7 jours précédents la mesure 0 mm (vert) , <5mm (jaune) , > 10 mm (rouge)

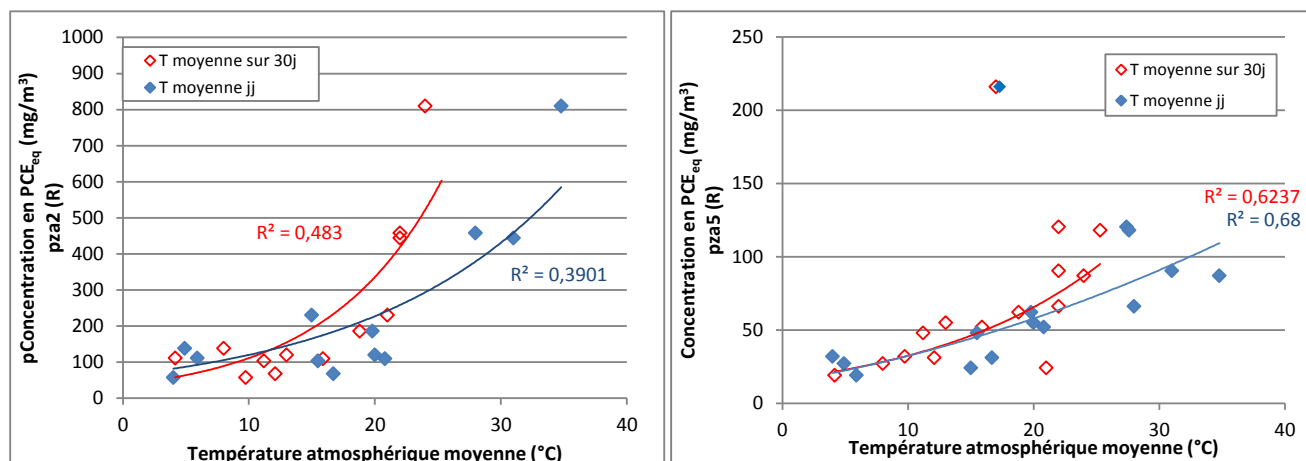
**FIGURE 11 - CONCENTRATIONS EN PCÉEQ SUR DEUX QUADRUPLETS EN FONCTION DE LA PLUIE**

## 2.3 La température

### 2.3.1 Variations saisonnières

L'influence de la température sur les concentrations dans les gaz du sol a été étudiée dans la littérature essentiellement vis-à-vis des transferts vers l'air intérieur (Folkes et al. 2009, Rivett et al., 2011). L'influence sur les concentrations dans les gaz du sol étudiée par Bekele et al. (2014) pour une source en TCE dans la nappe met clairement en évidence une augmentation des concentrations lors des périodes estivales.

Sur le site atelier de TEMPAIR, sur l'ensemble des mesures réalisées dans les piezaires durant les 13 campagnes, des coefficients de corrélations de Pearson ont été calculés entre les concentrations mesurées et la température. Il ressort des corrélations positives pour la majorité des ouvrages captant les remblais (voir figure ci-dessous).



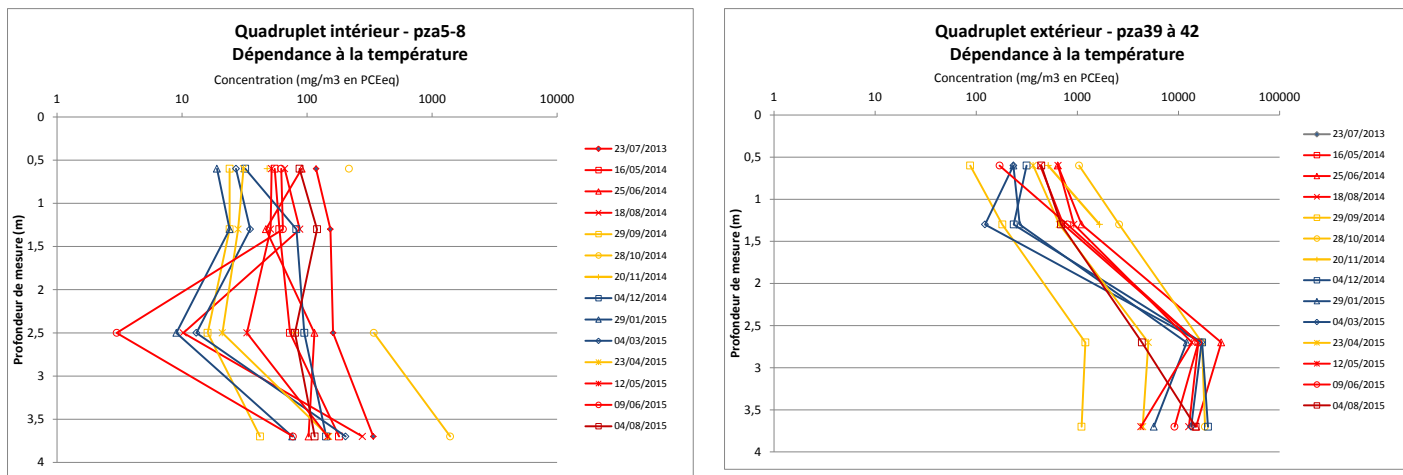
Pza2 situé dans le panache en dehors du bâtiment

Pza5 situé dans le panache sous le bâtiment

**FIGURE 12 - CONCENTRATIONS EN PCÉEQ DANS LES GAZ DU SOL EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DANS LES REMBLAIS POUR UNE SÉLECTION DE PIEZAIRS**

La propagation en profondeur de l'effet de la température sur les concentrations dans les gaz du sol est illustrée ci-dessous sur deux quadruplets de piezaires. Il semble que l'augmentation des concentrations avec

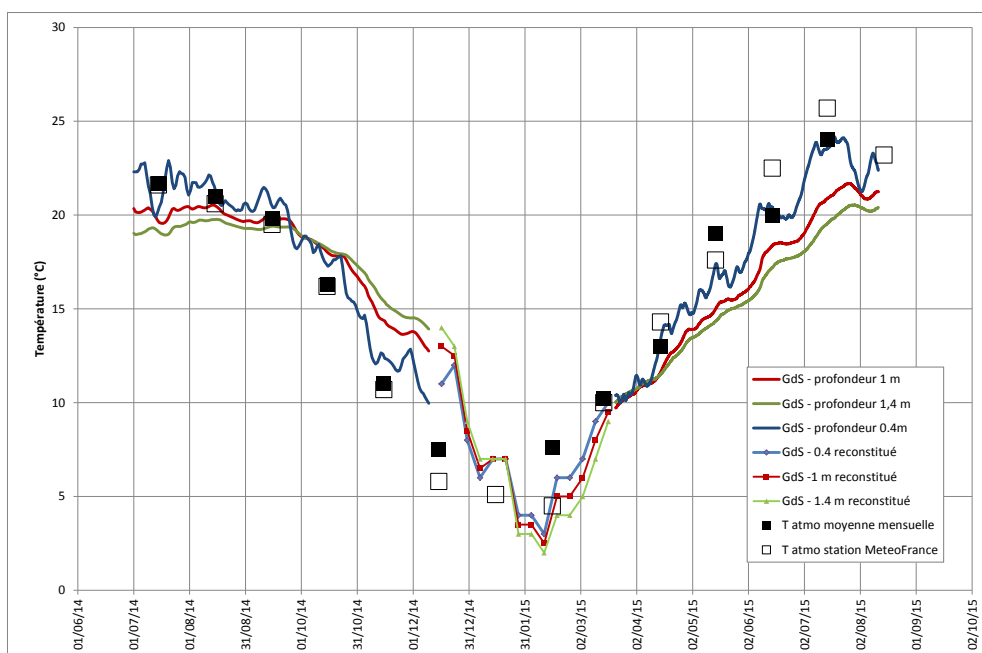
la température visible dans les remblais et dans les limons hauts n'apparaît pas dans les formations sous-jacentes.



En fonction de la température extérieure 0 à 10°C (bleu) de 10 à 20°C (orange) et de 20 à 35°C (rouge)

**FIGURE 13 - CONCENTRATIONS EN PCCEQ SUR DEUX QUADRUPLÉTS EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE**

Les températures de l'air atmosphérique et des sols (mesurées avec la sonde capacitive) sont présentées sur la figure ci-dessous. Lors de l'année de suivi, la température a varié dans les remblais (0,4 m) de 3 à 23°C et de 2 à 20°C dans les limons (1,4 m), alors que la nappe présentait une température relativement stable proche de 15°C.



**FIGURE 14 - CHRONIQUE DE TEMPERATURES DE L'AIR ET DES SOLS DE JUILLET 2014 A AOUT 2015**

Ces températures ont une influence sur la volatilité du PCE et dans une moindre mesure sur son coefficient de diffusion dans les gaz :

- **Volatilité** : La pression de vapeur saturante du PCE est dépendante de la température. L'application de l'équation d'Antoine et les constantes données par Yaws (1999) aux températures mesurées dans les gaz du sol permettent d'estimer la pression de vapeur saturante et donc la concentration à l'équilibre dans la source. Sur la période de suivi, cette concentration d'équilibre varie d'un facteur 3,3 : entre 43 g/m<sup>3</sup> en janvier 2015 et 144 g/m<sup>3</sup> en juillet 2015 ;
- **Diffusion** : le coefficient de diffusion gazeux du PCE varie sur la période de mesure entre 0,065 et 0,074 cm<sup>2</sup>/s, correspondant à une augmentation entre l'hiver et l'été de 14 %.

### 2.3.2 Variations diurnes

Lors des différents suivis de concentrations dans les gaz du sol, le gradient thermique entre l'air intérieur et l'air extérieur ( $T_{int}-T_{ext}$ ) suit un cycle journalier : il augmente à partir du milieu d'après-midi jusqu'à un maximum en fin de nuit puis décroît de 5-6h du matin jusqu'en début d'après-midi.

Ainsi, la nuit, l'air intérieur plus chaud est moins dense que l'air froid extérieur a tendance à monter en altitude, favorisant des écoulements d'air en base du bâtiment. Cet air peut provenir de l'extérieur du bâtiment mais également des terrains sous-jacents. La figure suivante confrontant les concentrations en PCE dans les gaz du sol sous dalle à la différence de température entre l'air intérieur et l'air extérieur montre une augmentation des concentrations la nuit corrélée avec le gradient thermique. Ce phénomène ne semble pas avoir été étudié dans la littérature, mais il est possible que ce soit en partie la propagation de la faible dépression dans les sols qui contribue à attirer la pollution sous la dalle et augmenter les concentrations.

La nuit, les conditions météorologiques différentes de celles en journée ne se limitent pas au gradient thermique, mais concernent également le vent, la pression atmosphérique et la stabilité de l'atmosphère. Ainsi, l'effet de ces différentes variables ne peut être aisément dissocié.

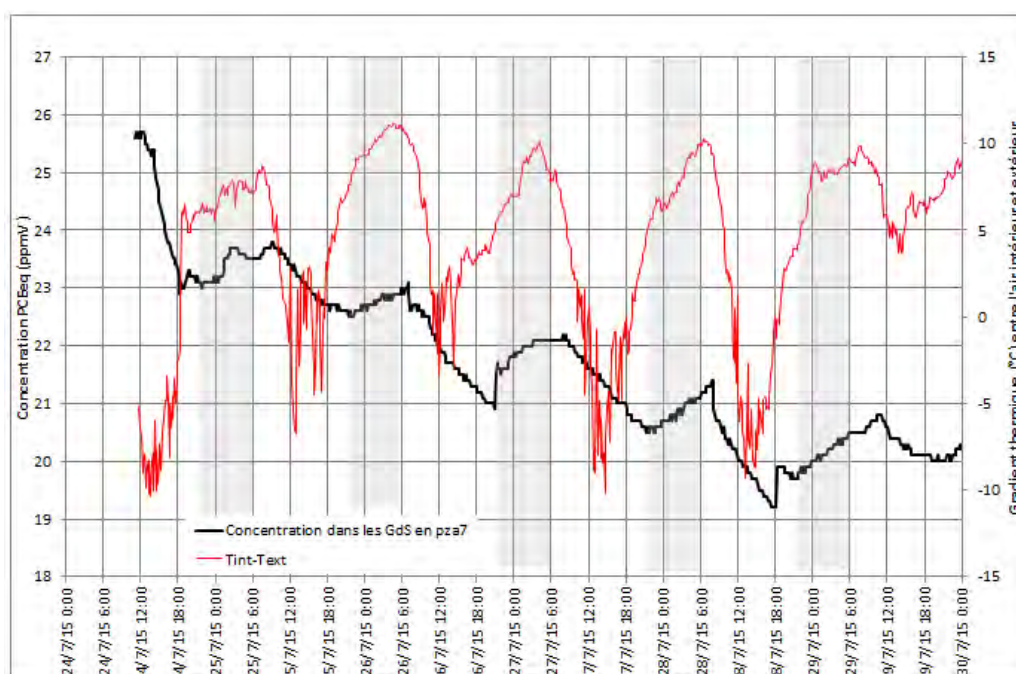


FIGURE 15 - SUIVI DES CONCENTRATIONS EN PCEeq DANS LES GAZ DU SOL SOUS DALLE ET DU GRADIENT THERMIQUE

## 2.4 Le vent et la pression atmosphérique

### 2.4.1 Variations pluri-journalières

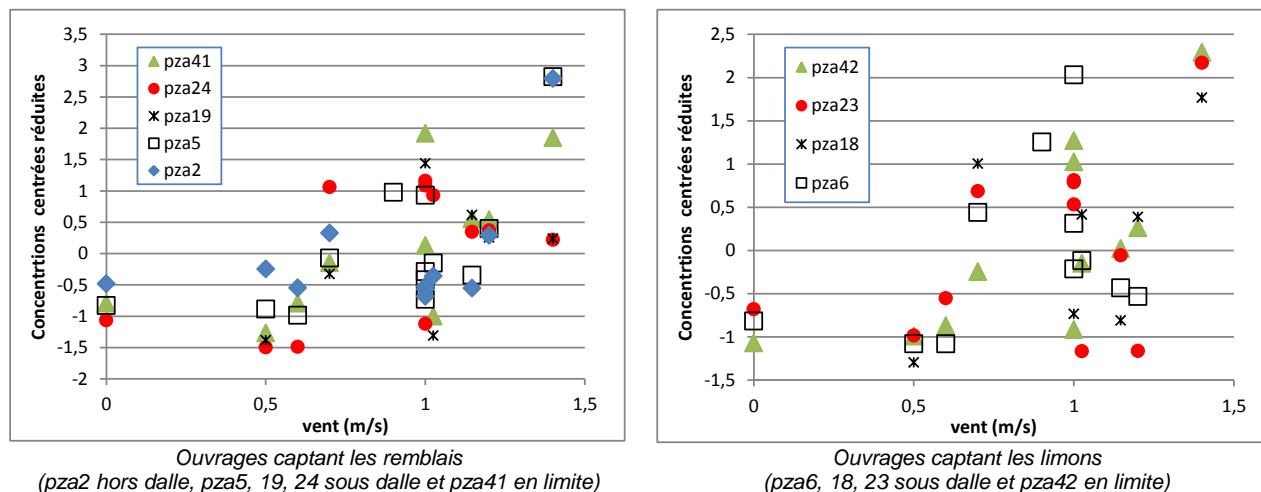
#### Vent

L'influence du vent sur les transferts vers l'atmosphère a été étudiée par plusieurs auteurs, en particulier en lien avec l'exhalation de radon (Kojima et Nagano, 2000, Riley et al., 1996 & 1999, Sharan et Kumar 2009). Ces travaux montrent que le vent peut conduire pour des terrains perméables à une entrée/sortie d'air dans les terrains superficiels, cet effet de chasse conduisant alors à une réduction des concentrations dans cette zone d'influence et à l'augmentation des concentrations en dessous.

Pour le site atelier TEMPAIR, sur la majorité des ouvrages captant les remblais (< 0,5 m de profondeur), les concentrations sont corrélées (faiblement) positivement avec le vent comme le montre la figure de gauche



ci-dessous ( $r^2$  compris entre 0,2 et 0,5). Cette corrélation positive affecte non seulement les ouvrages hors bâtiment mais proches (pza41 sous la dalle :  $r^2 = 0,5$  et pza2 à quelques mètres de garages dallés :  $r^2=0,2$ ) mais également ceux sous le bâtiment (pza24 proche de la source :  $r^2=0,3$  et pza5 dans le panache :  $r^2=0,4$ ). Dans les limons, la figure de droite tend à montrer une corrélation positive également mais moins marquée entre le vent et les concentrations sur certains ouvrages captant la partie haute des limons ( $r^2$  compris entre 0,15 et 0,5). L'influence du vent n'est pas visible sur les ouvrages plus profonds (sables et limons bas).



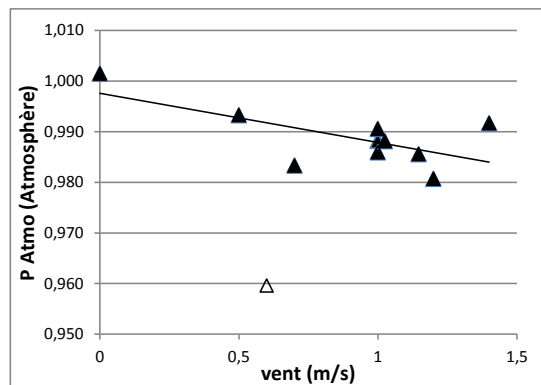
**FIGURE 16 - CONCENTRATIONS EN PCEeq DANS LES GAZ DU SOL EN FONCTION DU VENT**

L'explication de l'effet positif du vent sur les concentrations sur ce site atelier s'explique d'une part par la position de la source (en limite sud-ouest du bâtiment dans la zone non saturée des sols) et d'autre part par les vents dominants qui sont majoritairement du sud. Ainsi, la suppression des sols côté sud associée au vent conduit à un écoulement des gaz vers le bâtiment et ainsi une augmentation des concentrations dans les gaz du sol sous bâtiment. Il est à noter que ce constat est fait pour des vents relativement faibles (inférieurs à 2 m/s) montrant le poids important de cette variable dans l'interprétation des mesures.

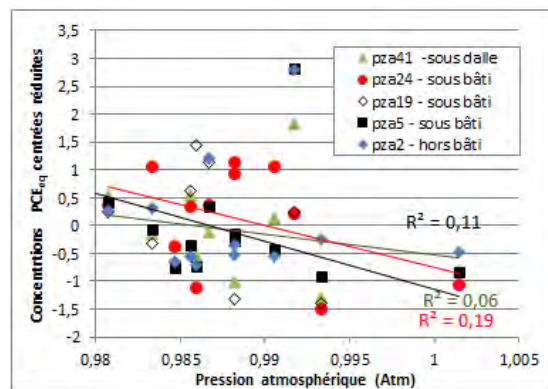
#### Pression atmosphérique

Plusieurs auteurs ont mis en évidence l'importance des variations de pression atmosphérique dans l'instationnarité des transferts (Nazaroff, 1985, Auer et al. 1996, Parker, 2003, Tillman et al. 2005, Yu et al. 2009). En particulier, Massmann (1992) a modélisé l'effet d'un cycle de pression atmosphérique sur les modifications des concentrations dans les gaz du sol et les échanges avec l'atmosphère, montrant que les échanges d'air peuvent s'effectuer jusqu'à plusieurs mètres dans la zone non saturée.

Le vent pouvant traduire des situations dépressionnaires, le graphique ci-contre présente la pression atmosphérique en fonction du vent pour les campagnes de mesures conduites. Il en ressort une possible corrélation négative entre le vent et la pression atmosphérique si l'on exclut la mesure réalisée en janvier 2015 pour laquelle la pression atmosphérique était particulièrement basse (triangle vide). Le facteur de corrélation est significatif en excluant la mesure de janvier 2015 ( $r^2=0,4$ ).



Le graphique ci-contre présente les concentrations dans les remblais et les pressions atmosphériques le jour des mesures (les mesures de janvier 2015 évoquées ci-avant n'y sont pas représentées). Les corrélations sont considérées comme non significatives ( $r^2$  inférieurs à 0,2), même si une tendance à la diminution des concentrations quand la pression augmente peut être suspectée.



Les résultats de la modélisation numérique sur une année montrent sur le site atelier l'influence significative des variations de la pression atmosphérique sur les concentrations et les flux vers l'air intérieur.

### Synthèse

Ainsi, les travaux ont permis de mettre en évidence une corrélation positive entre le vent et les concentrations en COV dans les gaz des sols, mais ne montrent pas de corrélation significative entre la concentration dans les gaz du sol et la pression atmosphérique. Les causes peuvent en être l'influence d'autres variables qui viennent masquer les effets des variations de pression.

### 2.4.2 Variations diurnes

Lors des suivis en continu, les chroniques de vent montrent qu'ils sont plus importants en journée et diminuent le soir et la nuit.

La diminution des vents de la fin d'après-midi au petit matin sont associés à une stabilisation atmosphérique : le jour, les courants atmosphériques de convection thermique ramènent rapidement au sol l'air qui se déplace en altitude, renforçant ainsi les vents de surface. Par contre, la nuit, en altitude, la convection thermique plus faible accentue les vents d'altitude. La stabilité atmosphérique exprimée par les classes de Pasquill montre que la nuit, les conditions sont généralement stables (classes D : neutre à F : extrêmement stable) associées à des vents faibles et la réduction des échanges dans l'atmosphère. La diminution de ces échanges conduit théoriquement à l'augmentation des concentrations en surface (qui ne se dispersent pas dans l'atmosphère).

A l'opposé du phénomène observé à l'échelle pluri-journalière, l'analyse graphique des suivis en continu de concentrations indique une corrélation inverse entre le vent (augmentation en journée) et les concentrations dans les gaz du sol (augmentation la nuit). Les variations de concentrations sont cependant très faibles (quelques pourcents) et d'amplitude inférieure à celles mises en évidence à travers les variations pluri-journalières évoquées précédemment.

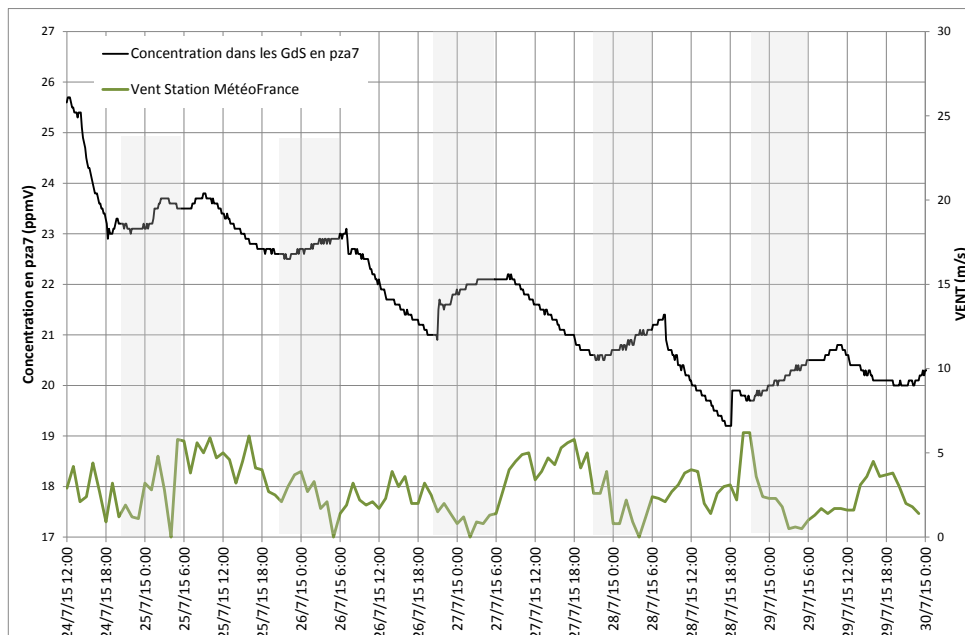


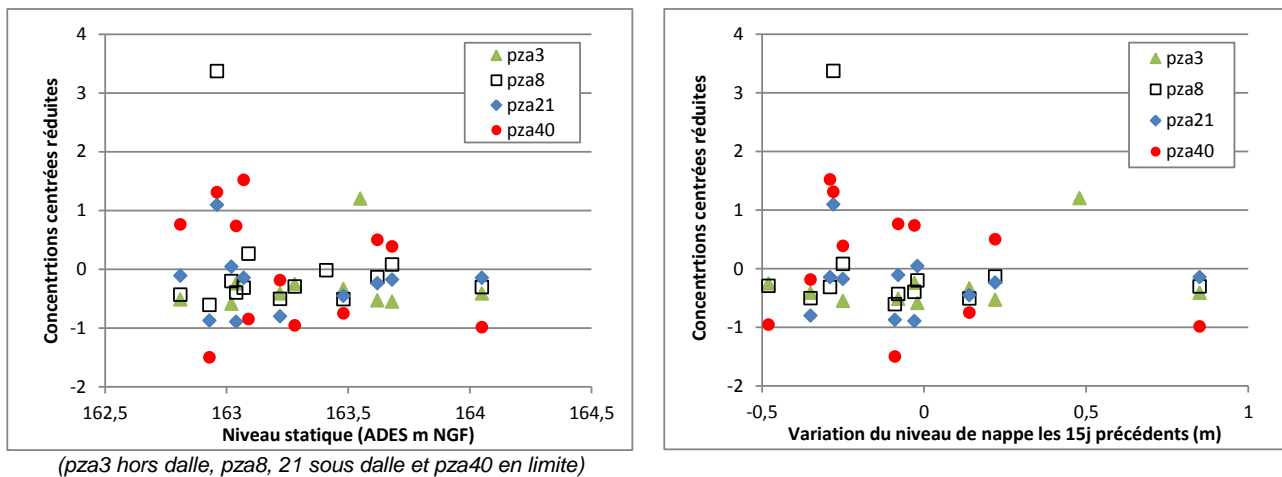
FIGURE 17 – VARIATIONS DIURNES DES CONCENTRATIONS EN PCEeq DANS LES GAZ DU SOL ET DU VENT

Cette interprétation ne peut être dissociée de l'éventuel effet du gradient thermique (voir § 2.3.2), ces deux variables qui sont le vent et le gradient thermique étant corrélées à cette échelle d'observation diurne.

A cela s'ajoute l'effet potentiel des variations de pression atmosphérique qui a théoriquement tendance à diminuer en fin de journée par suite du réchauffement de la journée et à augmenter la nuit et le matin. Ce phénomène n'est pas clairement visible sur les chroniques de pression atmosphérique mesurées, ne permettant pas d'apprécier le lien éventuel entre les concentrations et les variations diurnes de pression.

## 2.5 Variations de niveau de nappe

La recherche d'une corrélation entre les concentrations et les variations de niveaux de nappe a été réalisée en confrontant les concentrations aux cotes de nappe et à ses variations cumulées sur 4, 7, 15 et 30 jours précédents les mesures. Les coefficients de corrélation avec la cote de la nappe sont négatifs sur la majorité des points mais non significatifs, ne faisant pas ressortir de corrélation. Il en est de même pour les variations de niveau de nappe étudiées qui ne semblent pas influencer significativement les concentrations dans les gaz du sol.



**FIGURE 18 : CONFRONTATION DES CONCENTRATIONS EN PCEEQ DANS LES SABLES AUX VARIATIONS DE NIVEAU STATIQUE**

De son côté, la modélisation numérique montre que pour une perméabilité de dalle faible ( $K=2.10^{-16} \text{ m}^2$ ), la baisse de la nappe conduit à une dépression plus élevée sous le bâtiment entraînant une réalimentation par les terrains en dehors de l'emprise du bâtiment. Cet écoulement gazeux conduit à une augmentation des concentrations dans les zones sous influence de la source pouvant atteindre un facteur 2 (dans les sables) à 5 (dans la partie basse des limons).

## 2.6 Recommandations

L'influence des variables hydro-météorologiques étudiées nécessite leur prise en compte dans la conception d'un réseau de mesure, dans le dimensionnement des campagnes et dans leur interprétation.

Lors de la réalisation de prélèvements pour la détermination des concentrations dans les gaz du sol, l'information est généralement relativement ponctuelle dans le temps et résulte d'une multitude de facteurs pouvant avoir des effets synergiques et antagonistes, les concentrations dans les gaz du sol pouvant varier de plusieurs ordres de grandeur. Il s'agit donc d'une image ponctuelle dans un système dynamique comme ont pu le montrer les travaux du projet TEMPAIR. Ainsi, il est important, pour pouvoir interpréter la mesure et la comparer à d'autres campagnes, de prendre en compte l'ensemble des éléments pouvant contribuer à influencer la concentration. Ces éléments, indépendamment les uns des autres sont présentés dans le tableau ci-dessous.

**Il est important de mentionner que le dimensionnement des campagnes de mesure de concentrations dans les gaz du sol nécessite au préalable de bien appréhender le fonctionnement du système.** Le fonctionnement du système est dépendant de la succession lithologique, de la profondeur et des variations des niveaux de nappe, de la direction et l'amplitude des vents, les caractéristiques des aménagements et bâtiments présents, et de la localisation de la source (si tel n'est pas l'objectif des mesures). Cette connaissance repose, en partie, sur des mesures de concentrations réparties à différentes profondeurs et suivant un espacement adapté (sur le site atelier, en présence d'une source en PCE dans les sols, les concentrations varient spatialement jusqu'à 3 ordres de grandeur à des distances de moins de 20 m).

Elle permettra d'anticiper les effets potentiels des variations de conditions hydro-météorologiques et ainsi de définir les périodes les plus propices et le nombre de campagnes nécessaires. Sans cette compréhension, l'interprétation de la variabilité temporelle des concentrations est incertaine, voire ne peut être conduite.

L'interprétation quant à la représentativité temporelle des mesures nécessite du recul qu'une seule campagne de mesure ne peut apporter. Tenant compte de cela, il nous semble important de suivre la recommandation portée par l'ensemble des guides et normes en vigueur de réaliser plusieurs campagnes de mesures dans des conditions météorologiques distinctes dépendant de terrains, de la localisation de la source, des recouvrements du sol, de l'objectif des mesures...

Rappelons enfin que le dimensionnement d'un réseau de mesures est également dépendant des objectifs de l'étude. En effet, la recherche de source, l'identification d'un potentiel de transfert vers un bâtiment existant, l'estimation des impacts dans un futur bâtiment ou la surveillance nécessitent un dimensionnement spécifique. Les recommandations ci-dessous sont ainsi à moduler en fonction de l'objectif de l'étude.

**TABLEAU 3 – INCIDENCE DES VARIABLES METEOROLOGIQUES SUR LES CONCENTRATIONS DANS LES GAZ DU SOL SUR LE SITE ATELIER**

Variable	Incidence sur les concentrations	Acquisition nécessaire
Température	L'augmentation de la température a un effet positif sur les concentrations dans les gaz du sol que ce soit sous dalle ou en zone non recouverte. Sur le site étudié, l'amplitude des variations de température dans les gaz du sol atteint un facteur 3. L'incidence de la température sur les concentrations est identifiée tant à partir des températures mesurées dans les gaz du sol que dans l'atmosphère compte tenu de la localisation de la source où l'influence de la température atmosphérique est significative.	Oui
Pluie	L'effet de la pluie sur les concentrations dans les gaz du sol dépend de son amplitude, du temps écoulé depuis ces pluies et de la localisation des points de mesure par rapport à la source et aux aménagements. Sous le bâtiment étudié, il a été mis en évidence une augmentation significative mais courte des concentrations moins de 48 heures après la pluie, puis, en fonction de la durée d'intégration de la pluie (7j ou 22, voire 30 jours), les effets sont respectivement une diminution ou une augmentation.	Oui
Niveau de nappe	Sur le site étudié (source en ZNS partiellement sous bâtiment), le lien entre les variations de niveau de nappe et les concentrations n'a pas été mis en évidence. La modélisation conduite montre cependant des variations possibles de concentrations	Oui
Pression atmosphérique	Sur le site étudié la corrélation entre les concentrations et les pressions atmosphériques n'a pu être clairement identifiée. La modélisation conduite montre cependant des variations possibles de concentrations.	Oui
Vent	Sur le site étudié, l'amplitude du vent a un effet positif sur les concentrations dans les gaz du sol.	Oui

### 3. Air intérieur - Facteurs influençant la variabilité temporelle des concentrations

#### 3.1 Analyse globale

Ce paragraphe présente de manière synthétique les variations de concentrations observées ainsi que l'influence théorique des variables suivies. Ces résultats et interprétations sont ensuite détaillés dans le paragraphe 3.2 reprenant chacune des variables que sont le chauffage, la dépression et le gradient thermique entre l'air intérieur et extérieur, le vent, la pluie, et des variables caractéristiques des cycles jour/nuit (température, humidité).

##### Avertissements :

*Mentionnons la difficulté, pour l'ensemble des analyses conduites, de découpler les influences des différentes variables. Les travaux réalisés illustrent la complexité des interactions entre les variables et les concentrations et les difficultés à interpréter les variations possibles des concentrations en intégrant l'ensemble des variables.*

*L'interprétation menée, si elle est dépendante du site (bâtiment, pollution, lithologie...) et en cela ne peut être transposée à l'ensemble des situations, permet de mettre en évidence des phénomènes météorologiques qu'il convient d'intégrer à l'interprétation des campagnes de mesures dans l'air intérieur. La complexité de l'interprétation conduite sur le site atelier instrumenté de TEMPAIR met en exergue que l'interprétation de la variabilité sera exacerbée dans un contexte de méconnaissance de la pollution dans le milieu souterrain (localisation de la source, géométrie du panache).*

*Ainsi, si les résultats du projet TEMPAIR peuvent éclairer les prestataires sur les différents phénomènes qu'il conviendra de prendre en compte en plus des mesures de concentrations en polluants dans l'air intérieur, aucune grille simple d'aide à l'interprétation de la variabilité temporelle ne peut être établie.*

##### 3.1.1 Préambule

L'étude de la variabilité des concentrations dans l'air intérieur et de l'influence des différentes conditions météorologiques a été menée dans le projet TEMPAIR à travers des campagnes de suivi des concentrations dans l'air intérieur du site atelier aux saisons d'hiver, printemps et été, avec deux campagnes ont été réalisées en conditions de chauffage.

Les variables enregistrées sont le vent, la température intérieure et extérieure, l'humidité intérieure et extérieure, la pression atmosphérique, la dépression entre le sol et l'air intérieur, la saturation en eau des terrains, le niveau statique de la nappe. La concentration dans les gaz du sol a été mesurée ponctuellement à chaque campagne. Dans ce chapitre sont présentées pour chaque variable étudiées les conclusions des travaux menés.

L'étude des facteurs d'influence a été réalisée à trois échelles temporelles :

- A l'échelle saisonnière par comparaison des résultats des différentes campagnes conduites en été, en hiver et au printemps.
- A l'échelle de périodes pluri-journalières au sein de chaque période de suivi (allant de 2,5 à 9 jours) à travers l'analyse graphique et l'établissement de facteur de corrélation de Pearson.
- A l'échelle journalière. La plupart des variables étudiées montrent des variations périodiques journalières assez marquées, par exemple le vent et la température présentent une augmentation durant la journée puis une diminution durant la nuit ; l'humidité relative de l'air présente une variation opposée. Au-delà de l'analyse graphique et des coefficients de Pearson, l'analyse statistique des séries temporelles a été conduite. L'objectif a été d'étudier pour certaines campagnes la cyclicité et le poids des différentes variables climatiques (vent, température, humidité...) sur la concentration mesurée dans l'air intérieur afin d'apprécier le potentiel effet retard des variations sur les concentrations.

### 3.1.2 Variabilité temporelle mesurée

A travers les différentes campagnes de suivi des concentrations dans l'air intérieur, synthétisées dans le tableau ci-dessous ont été mis en évidence une variabilité saisonnière pouvant atteindre un facteur 9, des variations au sein des campagnes de durées de 2 à 9 jours pouvant atteindre un facteur 7 et des variations diurnes qui, de moindre amplitude, peuvent néanmoins atteindre un facteur 2.

**TABLEAU 4 - CONCENTRATIONS EN PCE<sub>eq</sub> DANS L'AIR INTERIEUR MESUREES AU PID (MOYENNES HORAIRES)**

	Campagne 1		Campagne 2		Campagne 3a	Campagne 4
	1-a1	1-a2	2a	2b	3a	4
Dates	mai 2014 (2,5 jours)	mai 2014 (4 jours)	nov. 2014 (8 jours)	déc. 14 (5 jours)	mars 15 (9 jours)	Août 15 (6 jours)
Ventilation mécanique	Ventilation mécanique à 1 h <sup>-1</sup>		arrêtée		arrêtée	arrêtée
Chauffage	non		oui		oui	non
Concentration moyenne dans les remblais sous atelier PCE <sub>eq</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	-	-	R : 522 (début)	R : 240 (fin)	R : 233 (fin)	R : 432 (début)
Conc. min en PCE <sub>eq</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	120	225	375	979	231	102
Conc. moyenne en PCE <sub>eq</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	247	303	796	2104	306	310
Conc. max en PCE <sub>eq</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	401	604	1164	2787	569	700
Facteur max / min (-)	3,3	2,7	3,1	2,8	2,5	6,9

#### Variations saisonnières

Les écarts entre les concentrations moyennes sur les périodes de mesure atteignent un ordre de grandeur, allant de 250 à 2100 µg/m<sup>3</sup>.

Les concentrations moyennes les plus élevées sont mesurées lors d'une des campagnes hivernales. Globalement, les mesures réalisées montrent l'influence du chauffage sur la dépression entre les gaz du sol et l'air intérieur, qui passe en moyenne de moins de 1 Pascal en conditions non chauffées à 2-3 pascals en conditions chauffées. Cette augmentation est associée à des gradients thermiques augmentés en moyenne de 1-6 °C à 12°C entre ces deux conditions. Mentionnons qu'une seconde campagne menée en fin d'hiver montre quant à elle des concentrations moyennes analogues à celles mesurées au printemps et en été.

Au printemps et en été, sur les 3 périodes de suivi allant de 2 à 9 jours, les concentrations moyennes sont proches (écarts inférieurs à un facteur 1,2).

#### Variations pluri-journalières

Au sein de chaque campagne, les amplitudes de variation<sup>9</sup> sont similaires pour la majorité des campagnes : d'un facteur 2 à 3 mais atteignent un facteur 7 lors de la campagne estivale de 2015 et lors de la campagne hivernale si elle est considérée dans son intégralité (campagne 2a et 2b qui se suivent).

Les évolutions des concentrations en PCE dans l'air intérieur font ressortir :

- une certaine cyclicité des variations pour certaines des campagnes. Ces cycles marquent une différence de comportement jour/nuit ;
- pour certaines campagnes des tendances plus longues pluri-journalières associées à des conditions de stabilité atmosphérique présentes sur plusieurs jours.

#### Variations diurnes

Les campagnes réalisées ont mis en évidence à certaines périodes une cyclicité des concentrations dans l'air intérieur sur des périodes de 24 heures. Les amplitudes des variations sont en moyenne d'un facteur 1,5 à 2, elles sont observées tant pour les campagnes hivernales que pour la campagne estivale.

Deux types de cyclicité sont observés :

<sup>9</sup> Elles ont été établies à partir de données moyennées sur 1 heure

- les périodes durant lesquelles les concentrations augmentent et diminuent durant la journée. Pour la campagne hivernale, les évolutions de concentrations sont corrélées positivement aux vents et à la température extérieure tandis que pour la campagne estivale, elles sont corrélées à la pression atmosphérique ;
- une période hivernale durant laquelle les concentrations ont tendance à augmenter le soir et la nuit avec un maximum atteint durant la nuit ou le matin. Des corrélations significatives avec les conditions météorologiques sont identifiées : corrélation négative avec le vent ( $r^2=0,8$ ) et positive avec l'humidité extérieure ( $r^2=0,6$ ), la différence de température intérieur-extérieur ( $r^2=0,5$ ), la pression atmosphérique ( $r^2=0,6$ ) et la dépression entre les gaz du sol et l'air intérieur ( $r^2=0,5$ ).

### Variables d'influence

Les corrélations entre les concentrations et les variables d'influence lors de chacune des campagnes sont présentées à travers les coefficients de corrélation de Pearson (Tableau 5) et pour certaines d'entre elles, la projection des variables sur les axes principaux des Analyses en Composantes Principales<sup>10</sup> (Figure 19).

**TABLEAU 5 – SYNTHÈSE DES CORRELATIONS ( $R^2$  DE PEARSON) ENTRE LES CONCENTRATIONS DANS L'AIR INTÉRIEUR ET LES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES**

	Campagne 1		Campagne 2		Campagne 3a	Campagne 4
	1-a1	1-a2	2a	2b	3a	4
Dates	mai 2014 (2,5 jours)	mai 2014 (4 jours)	nov. 2014 (8 jours)	déc. 14 (5 jours)	mars 15 (9 jours)	Août 15 (6 jours)
Pression atmosphérique	0,21 (+)	0,24 (-)	0,02	0,32 (+)	0,13 (-)	0,43 (+)
Température intérieure	0,58 (-)	0,08 (+)	0,2 (-)	0,68 (-)	0,03	0,55 (-)
Température extérieure	0,26 (-)	0,21 (+)	0,00	0,61 (-)	0,47 (-)	0,32 (+)
Humidité intérieure	-	-	0,02	0,88 (-)	0,53 (+)	-
Humidité extérieure	0,44 (+)	0,23 (-)	0,45 (+)	0,33 (-)	0,02	0,49 (+)
Vent	0,55 (-)	0,12 (+)	0,53 (-)	0,33 (+)	0,06	0,04
Différence de température intérieure -extérieure	0,18 (+)	0,10 (-)	0,28 (+)	0,03	0,54 (-)	0,32 (+)
Différence de pression GdS-Air intérieur	0,36 (+) pza17	< 0,11 (+)	< 0,07 (+)	0,6 (+) pza5, 12	<0,14 (+)	0,4-0,5 (+) Pza5,17,12

Le Tableau 5 montre que les concentrations sont corrélées à l'ensemble des variables étudiées. Il met également en évidence l'absence de lien univoque entre les concentrations et chacune des variables météorologiques, avec des corrélations positives sur certaines campagnes et négatives sur d'autres. Seule la dépression du bâtiment vis-à-vis des gaz du sol présente sur toutes les campagnes une corrélation positive (elle n'est cependant pas toujours significative).

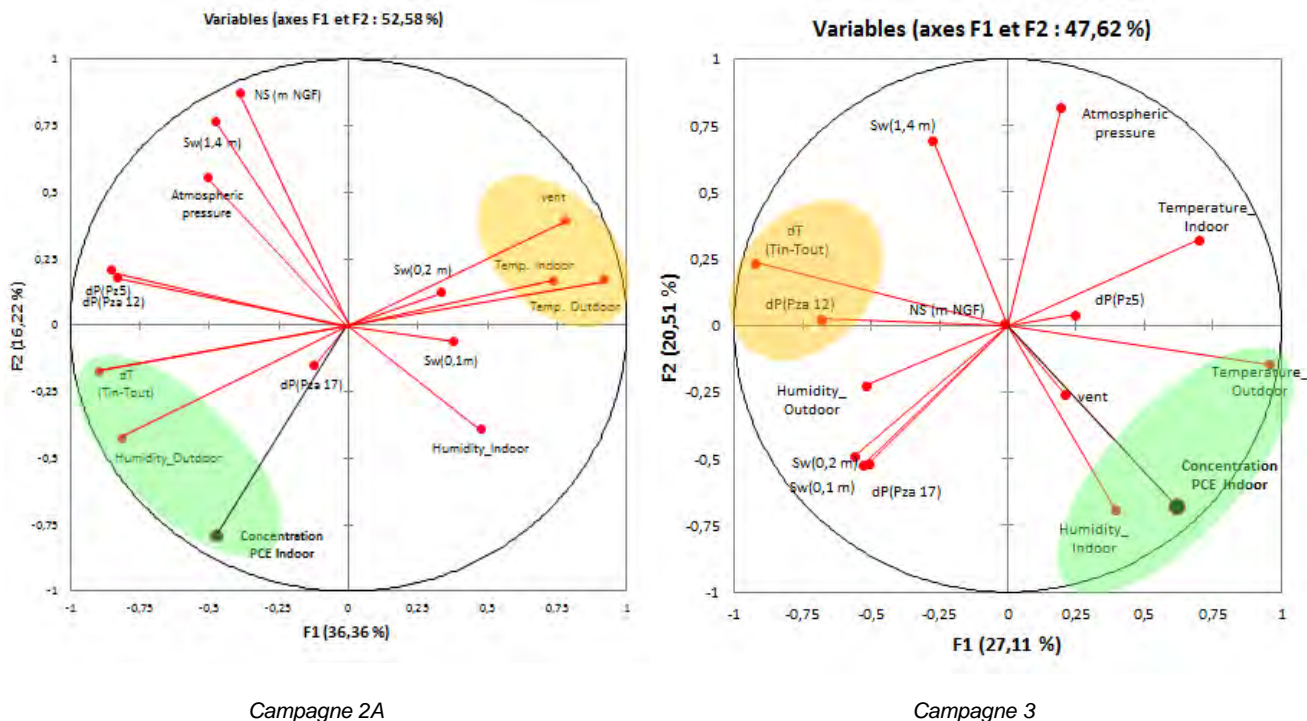
Mentionnons que les interprétations graphiques alimentées des facteurs de corrélation de Pearson font ressortir davantage de corrélations que les ACP réalisées. En effet, celles-là ont pu être réalisées par sous-périodes au sein des campagnes conduites permettant d'approfondir l'absence de corrélation issue de l'ACP. Les variables pour lesquelles au moins une des campagnes est corrélée significativement avec les concentrations (corrélation positive ou négative en fonction des campagnes) sont les suivantes :

- l'humidité relative extérieure ou intérieure (lié à la cyclicité journalière ou pour l'humidité extérieure aux périodes de forte stabilité atmosphérique),
- la température extérieure (lié à la cyclicité journalière ou aux périodes de stabilité atmosphérique) et intérieure (lié à l'effet du chauffage ou la cyclicité journalière),
- le gradient thermique (lié à l'effet du chauffage et aux périodes de stabilité atmosphérique),
- le vent (lié à la cyclicité journalière),
- la différence de pression entre les gaz du sol et l'air intérieur (lié majoritairement à l'effet du chauffage et à la baisse des températures extérieures).

<sup>10</sup> Afin de donner le même poids à l'ensemble des variables, les ACP ont été conduites à partir de variables centrées réduites.



Les interprétations présentées dans le § 3.2 permettent d'expliquer les origines des comportements différents. Elles sont vraisemblablement liées en partie à l'historique de pluie conduisant à des transferts de polluants dans la zone d'influence de la dépression du bâtiment modifiant l'impact du vent entre les différentes campagnes.



**FIGURE 19 - ACP D'UNE SELECTION DE CAMPAGNES DE MESURE DANS L'AIR INTERIEUR- REPRESENTATION DES VARIABLES SUR LES FACTEURS PRINCIPAUX**

## 3.2 Influence des variables hydrométéorologiques et du chauffage

### 3.2.1 Influence du chauffage et de la température

#### 3.2.1.1 Préambule

Le chauffage d'un bâtiment conduit à un gradient thermique entre l'air intérieur et extérieur et en conséquence à un gradient de pression supplémentaire entre le sol et l'air intérieur. Ce gradient de pression conduit à augmenter les transferts des pollutions volatiles des gaz du sol sous-jacents vers l'air intérieur.

#### 3.2.1.2 Température, gradient thermique et dépression

Entre la campagne réalisée en conditions estivales pour un bâtiment non chauffé et celles réalisées en automne et hiver, l'impact du chauffage a été mis en évidence : la dépression entre les gaz du sol et l'air intérieur varie de moins de 1 Pascal en conditions non chauffées à 2 - 3 pascals en conditions chauffées.

Cette augmentation de dépression est associée à des gradients thermiques en moyenne de 1 à 6 °C (respectivement campagne 1 et 4) à 12°C (campagnes hivernales 2 et 3). La Figure 20 montre pour les campagnes où le gradient thermique est supérieur à 2°C, la dépression est positivement corrélée au gradient thermique pour la campagne 2 (hivernale)  $r^2 = 0,7$ , la campagne 4 (estivale) :  $r^2 = 0,5$  et dans une moindre mesure pour la campagne 3 (hivernale) :  $r^2 = 0,3$ .

Par ailleurs, certaines périodes sont marquées par l'absence d'augmentation de la température extérieure en journée accentuant le gradient thermique et ainsi la dépression. C'est le cas en seconde partie de la campagne 2 (augmentation du dT à 16° et du dP à 3 Pa) de la campagne 4 (augmentation du dT à 8° et du dP de 0 à 0,7 Pa).

Enfin, mentionnons que le vent peut également avoir un effet supplémentaire sur la dépression : en période estivale (campagne 4), trois épisodes de vent de 8 m/s augmentent ponctuellement la dépression de plus de 1 Pa.

#### 3.2.1.3 Dépressions et concentrations dans l'air intérieur

##### Variations saisonnières

Nous retiendrons que la concentration dans l'air intérieur est augmentée entre la campagne estivale et la première campagne hivernale (où l'impact du chauffage est clairement établi) d'un facteur 2 à 4.

Lors des suivis réalisés, pour l'ensemble des campagnes, la relation entre dépression et concentration est toujours positive quelle que soit la saison. Pour certaines campagnes, la corrélation est significative ( $r^2 = 0,7$  pour campagne 2 dans son ensemble et  $r^2 = 0,4$  à 0,5 pour la campagne 4) tandis que pour la seconde campagne hivernale (3), les évolutions de concentrations ne sont pas significativement corrélées à la dépression ( $r^2 = 0,1$ ) et elles sont, ce qui semble de prime abord surprenant, inversement corrélées au gradient thermique ( $r^2 = 0,5$ ).

La corrélation entre la concentration et le gradient thermique est présentée en Figure 21 et Figure 20.

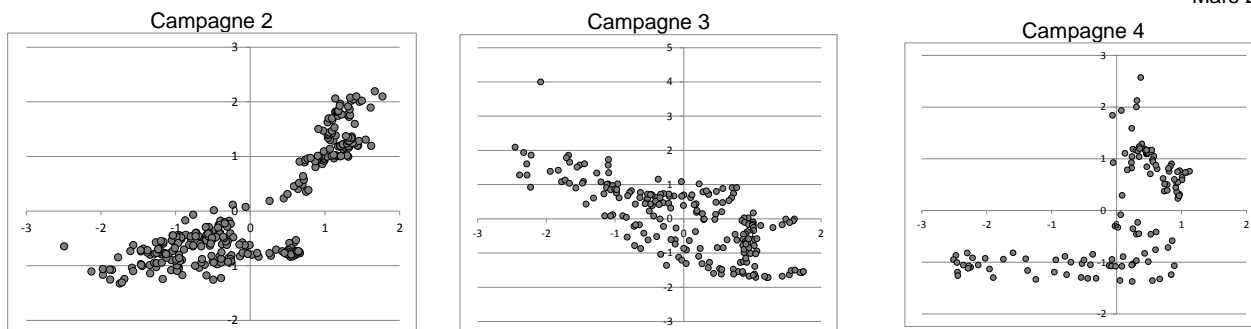
##### Variations pluri-journalières

Lors de la campagne hivernale 2, la chute de la température atmosphérique extérieure sur plusieurs jours en seconde partie de suivi (voir Figure 21) conduit à une augmentation de la dépression occasionnant une augmentation de la concentration dans l'air intérieur au cours de la période. Hors période de chauffage, ce phénomène est également visible pour la campagne 4.

Ainsi, au cours de ces campagnes, les concentrations ont été augmentées d'un facteur 3 à 5.

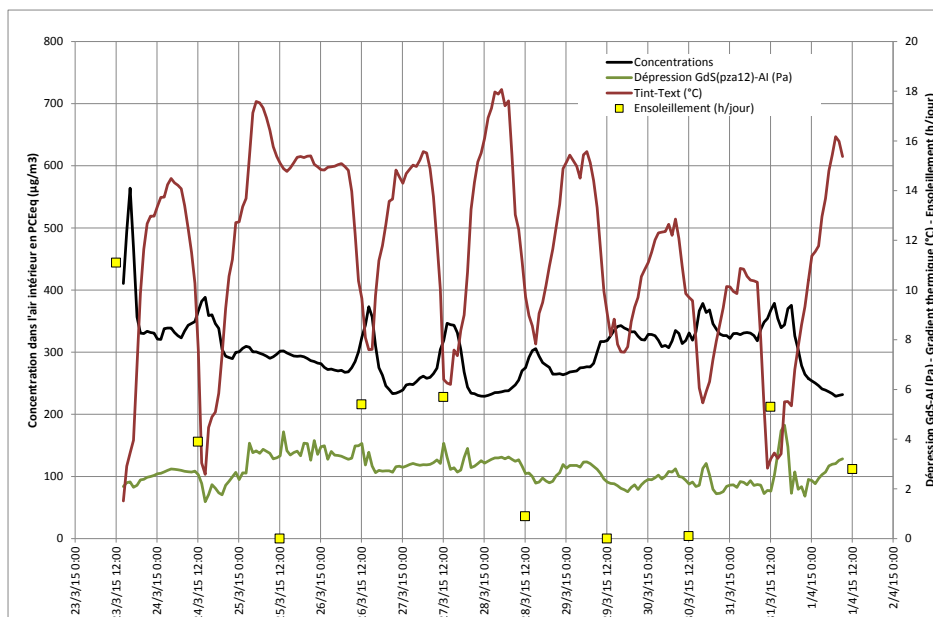
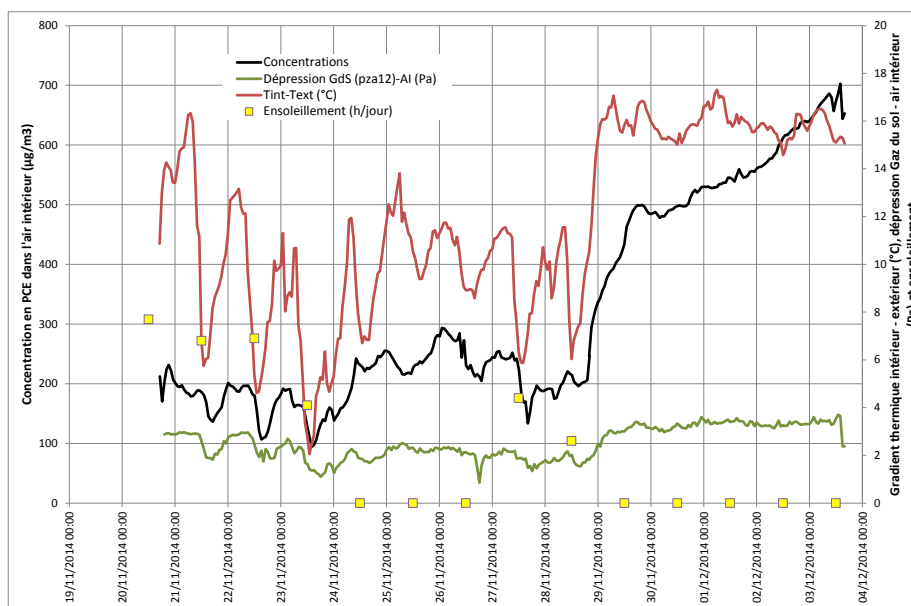
##### Variations diurnes

Quelle que soit la campagne, en dehors de périodes où l'absence d'ensoleillement empêche le réchauffement en journée, il est observé une cyclicité des températures en extérieur en hiver et en extérieur et intérieur en été, se traduisant par une cyclicité du gradient thermique, de la dépression et des concentrations. Notons que pour la campagne 3, les variations diurnes de concentrations ne sont pas liées à un transfert accru lié au chauffage du bâtiment mais davantage à l'effet du vent (voir § 3.2.2).



en x Gradient thermique intérieur-extérieur (centré réduit) et en y : Concentration dans l'air intérieur (centré réduit)

**FIGURE 20 - CORRELATION ENTRE LE GRADIENT THERMIQUE ET LA CONCENTRATION DANS L'AIR INTERIEUR LORS DES DIFFERENTS SUIVIS REALISES**



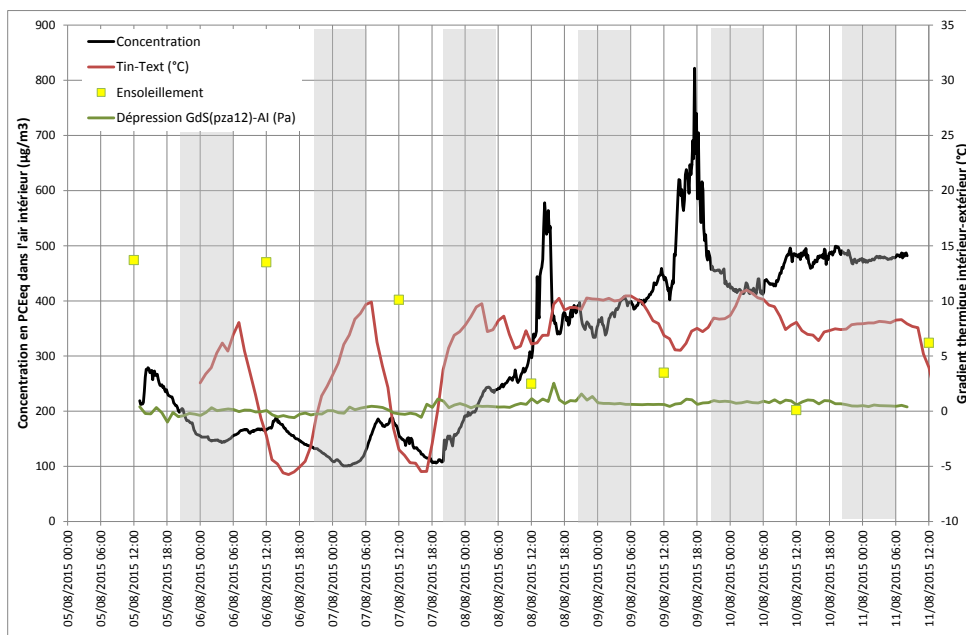


FIGURE 21 – EVOLUTION DU GRADIENT THERMIQUE ET DE LA CONCENTRATION LORS DES CAMPAGNES 2, 3 ET 4

## 3.2.2 Influence du vent

### 3.2.2.1 Préambule

L'influence du vent sur les transferts vers l'atmosphère a pu être étudiée par plusieurs auteurs, en particulier en lien avec les exhalations de radon (Kojima et Nagano, 2000, Riley et al., 1996 & 1999, Sharan et Kumar 2009). D'un point de vue théorique, le vent présente vis-à-vis des concentrations dans l'air intérieur un double effet :

- d'une part, il augmente le renouvellement d'air des bâtiments perméables (défauts d'étanchéité) ou dans lesquels la ventilation est dite naturelle (grilles d'entrée d'air). L'importance du renouvellement d'air occasionné dépend de l'orientation des vents par rapport à la localisation des entrées d'air et de leur intensité ;
- d'autre part, le vent peut générer des modifications du champ de pression dans les gaz du sol occasionnant des transferts spécifiques.

#### Résultats obtenus

Le premier type d'effet n'a pas été clairement mis en évidence dans le projet TEMPAIR. La perméabilité de l'atelier mesurée dans le cadre du projet FLUXOBAT suivant la norme NF EN 13829 est élevée<sup>11</sup> (24,6 m<sup>3</sup>/h/m<sup>2</sup> sous une dépression de 4 Pa), ce qui laisse suspecter un effet du vent du nord et de l'ouest sur le renouvellement d'air (les façades sud et est donnent sur un local limitant l'entrée d'air dans l'atelier). Le second type d'effet a été étudié à travers les mesures réalisées tant dans les gaz du sol que dans l'air intérieur.

Rappelons que dans les gaz du sol (voir § 2.4), les mesures réalisées sur différents piezaires du site atelier montrent un effet positif du vent sur les concentrations dans les gaz du sol sous le bâtiment dans les remblais et les limons. Lors des suivis en continu réalisés sur les piezaires deux types d'impact ont été identifiés :

- d'une part une augmentation des concentrations dans les gaz du sol la nuit lorsque les vents sont plus faibles. Les variations de concentrations demeurent cependant faibles ;
- d'autre part une augmentation de concentration dans les gaz du sol d'amplitude nettement supérieure est suspectée<sup>12</sup> lors d'un changement de direction du vent.

### 3.2.2.2 Influence sur la dépression Gaz du sol – Air intérieur

Pour l'air intérieur, l'analyse des corrélations croisées entre les variables que sont le vent, la différence de température et la dépression montre que pour l'ensemble des campagnes, à court terme, le vent est anti-corrélé avec la différence de température intérieure-extérieure ( $r^2$  variant de 0,2 à 0,5), ce comportement est classique des variations jour/nuit.

Le lien entre le vent et la dépression du bâtiment est différent entre les campagnes, au sein desquelles la corrélation peut également évoluer laissant suspecter que d'autres variables météorologiques interviennent :

- elle est négative lors de la campagne 2a, et sur 2 jours lors de la campagne 3a (24, 28, 29 mars);
- elle est positive lors des campagnes 1a2, la campagne 2b et sur 5 jours (25, 26, 27, 30 et 31 mars) lors de la campagne 3a.

L'interprétation proposée implique les directions du vent et le positionnement des ouvrages :

- ce sont les vents du sud qui conduisent à diminuer la dépression en pza12 et pza5, les ouvrages étant en effet situés sous le bâtiment plutôt au nord. Il peut être suspecté que la dépression aurait été accentuée du côté sud du bâtiment à ces périodes. Les vents sont du sud lors de la campagne 1a, 2a et les 24, 28, 29 mars de la campagne 3a ;
- les vents du nord conduisent au contraire à augmenter la dépression en pza12 et pza5, les ouvrages étant situés plutôt du côté de la façade au vent. Les vents sont du nord lors de la campagne 1a2 et 2b et les 25, 26, 27, 30 et 31 mars de la campagne 3a.

<sup>11</sup> La valeur par défaut des nouveaux bâtiments en application de la RT 2012 est de 1,7 m<sup>3</sup>/h/m<sup>2</sup> sous une dépression de 4 Pa

<sup>12</sup> L'impact du vent lors de ce suivi est combiné à l'impact de la pluie, les deux effets ne pouvant être discriminés

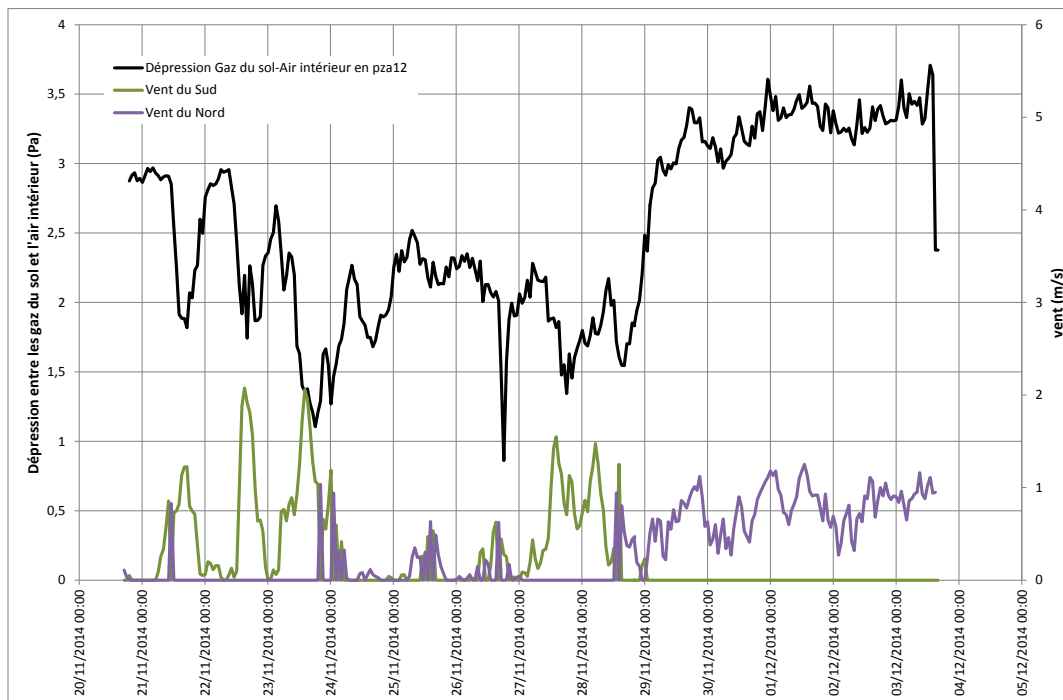
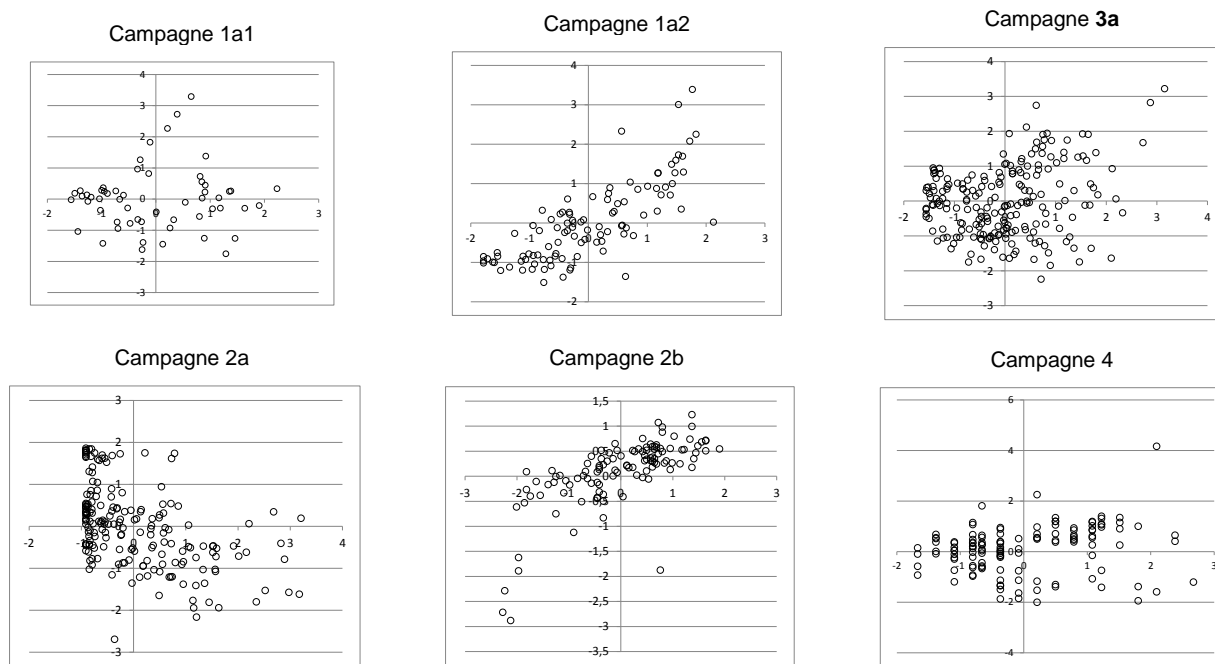


FIGURE 22 – EVOLUTION DU VENT ET DE LA DEPRESSION LORS DE LA CAMPAGNE 2



En x :le vent (centré réduit) et en y la différence de pression en pza12 (centré réduit)

FIGURE 23 - CORRELATION ENTRE LE VENT ET LA DIFFERENCE DE PRESSION ENTRE L'AIR INTERIEUR ET UN PIEZAIR SOUS BATIMENT LORS DES DIFFERENTS SUIVIS REALISES

### 3.2.2.3 Influence sur les concentrations

Cette interprétation de l'effet du vent sur les dépressions ne permet cependant pas d'expliquer l'effet du vent sur les concentrations, les analyses conduites ayant montré des corrélations parfois positives et parfois négatives. Compte tenu de la position de la source sous le bâtiment, le vent du sud devrait, toutes choses égales par ailleurs, conduire à une augmentation des concentrations dans l'air intérieur, Or, cela n'est pas

observé sur les mesures. Une des explications peut être liée à la pression motrice de l'air dans les sols au moment de ces vents. En conditions hivernales (campagnes 2 et 3), deux situations s'opposent : lorsque les sols sont en surpression après des épisodes pluvieux, les gaz alimentant le bâtiment proviendraient des terrains en profondeur sous la dalle (campagnes 2b et 3), tandis que lorsqu'ils sont en dépression, ils proviendraient davantage des remblais latéraux en dehors du bâtiment (campagne 2a).

Dans ces différentes conditions d'écoulement, l'augmentation du vent conduit ainsi :

- à l'augmentation des concentrations lorsque les écoulements de gaz sont ascendants et proviennent des limons et sables (campagnes 3), le vent confinant les pollutions sous le bâtiment. Ainsi, le jour, en présence de vent, les transferts vers l'air intérieur sont accrus, limitant l'effet des autres variables;
- a contrario quand les écoulements dans les gaz du sol proviennent des remblais proches de la surface, le vent conduit à introduire davantage d'air propre et diminue les concentrations dans l'air intérieur (campagne 2a).

Lors de la campagne 4, il ne semble pas y avoir de corrélation entre le vent et les concentrations.

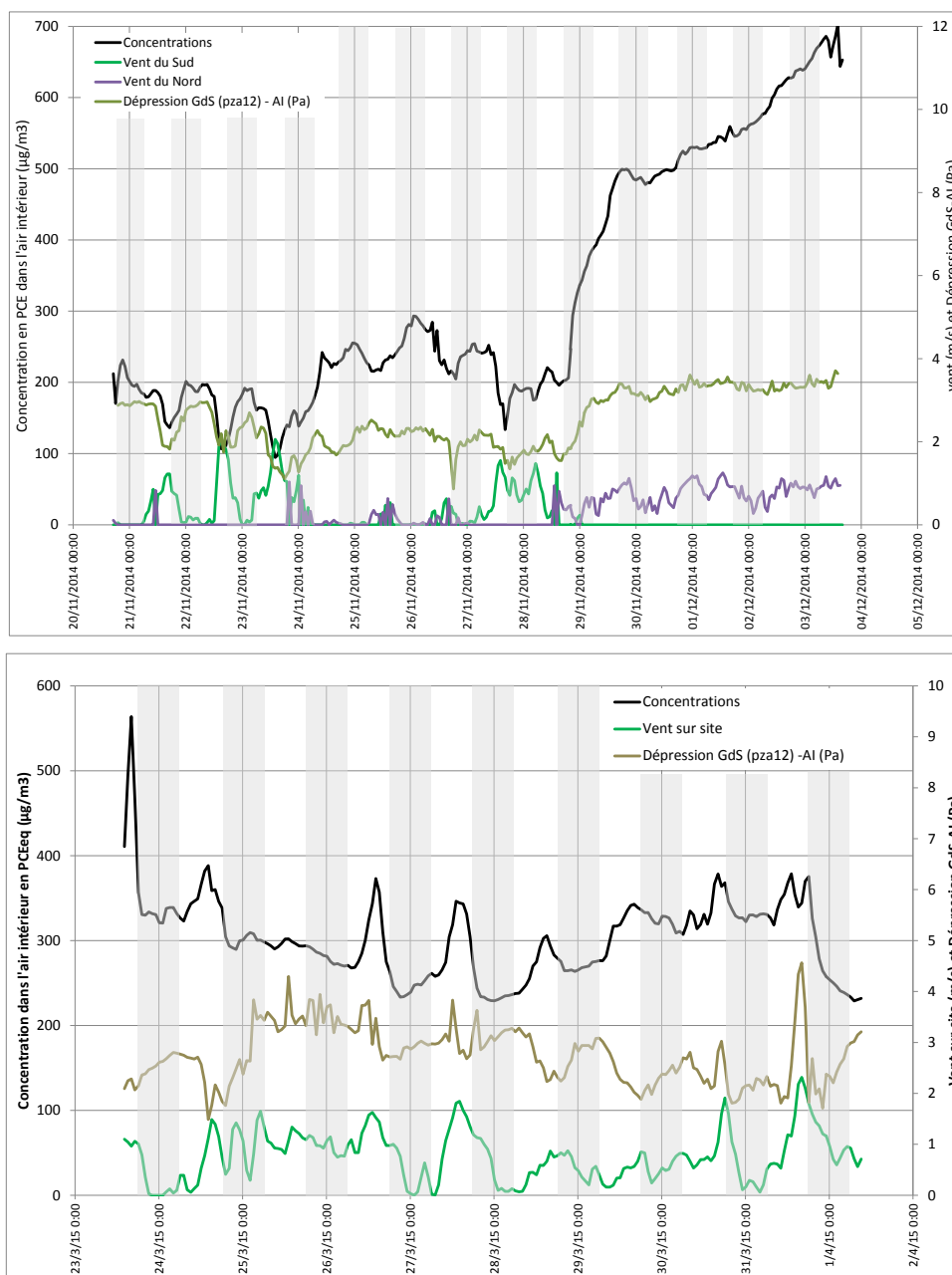
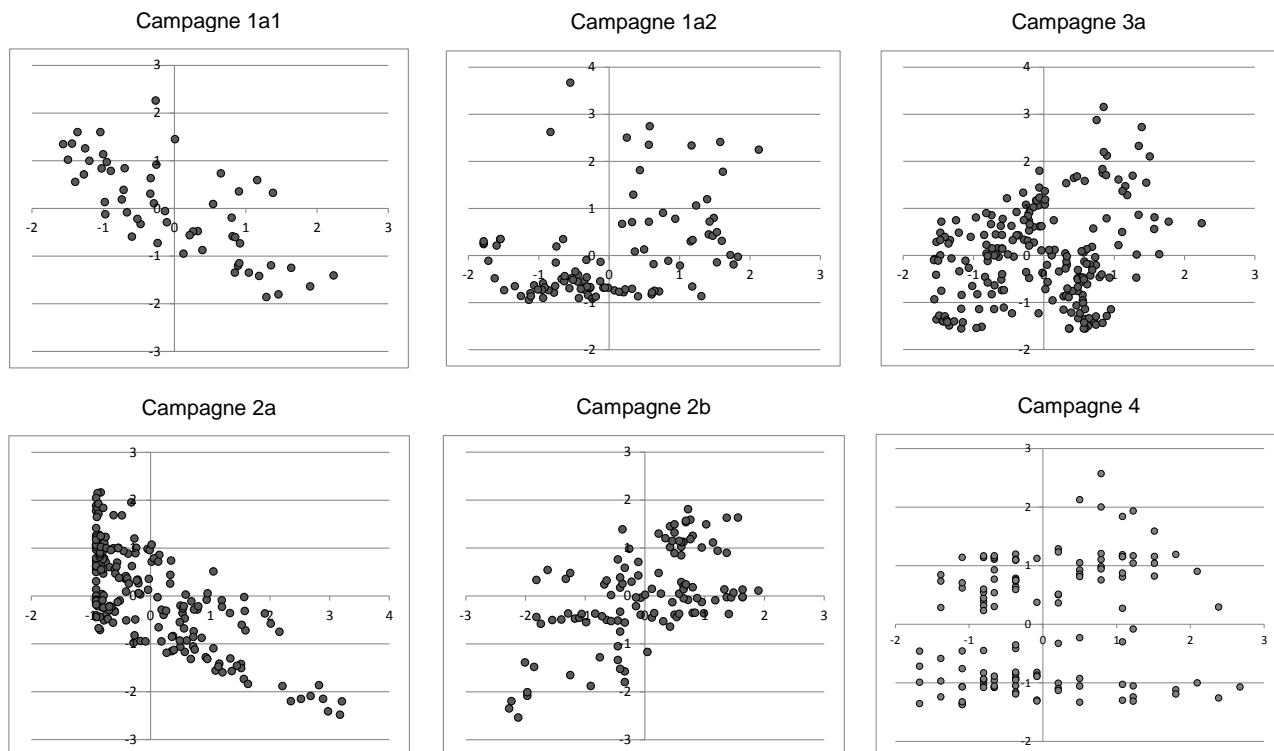


FIGURE 24 – EVOLUTION DU VENT ET DE LA CONCENTRATION LORS DES CAMPAGNES 2 ET 3



en x : Vent (centré réduit) et en y : Concentration dans l'air intérieur (centré réduit)

**FIGURE 25 - CORRELATION ENTRE LE VENT ET LES CONCENTRATIONS DANS L'AIR INTERIEUR LORS DES DIFFERENTS SUIVIS REALISES**

### 3.2.3 Influence de la pluie et de la saturation en eau des terrains

#### 3.2.3.1 Préambule

La pluie a un effet sur la modification des saturations en eau des terrains et ainsi sur les écoulements de gaz dans les sols.

Comme cela a pu être montré dans le chapitre traitant des gaz du sol, lors de l'épisode pluvieux, les gaz du sol sont évacués vers l'atmosphère afin de permettre l'infiltration d'eau. Au cours du passage du front d'infiltration, la pression du gaz augmente et celui-ci migre vers l'atmosphère en suivant le cheminement le plus perméable. En présence de bâtiment et de terrains présentant une modification sensible de la perméabilité en fonction de la saturation en eau (formations limoneuses par exemple), les gaz vont préférentiellement passer sous le bâtiment avant d'être évacués soit par la dalle si celle-ci est perméable soit sur sa périphérie si elle est peu perméable.

Après l'infiltration de l'eau météorique, lors de la diminution de la saturation en eau des terrains, les terrains sont en dépression. La dépression est plus marquée dans les terrains les plus isolés par rapport à l'atmosphère (en profondeur par exemple) et une réalimentation par l'atmosphère ou par les zones moins déprimées (sous les bâtiments par exemple) s'opère. Le cheminement du gaz est dépendant comme pour l'infiltration d'eau des caractéristiques des terrains et recouvrements.

#### 3.2.3.2 Résultats obtenus

Les temps nécessaires au rééquilibrage des pressions peuvent être significatifs, la modélisation conduite montre qu'ils peuvent être supérieurs à 7 jours après l'infiltration d'eau pour la situation modélisée (voir § 2.2), les terrains peuvent présenter encore dans les sables des dépressions de l'ordre de quelques pascals. Durant cette phase, sous l'atelier, les concentrations vont augmenter dans les sables et les limons durant plusieurs jours. La tendance dans les horizons de remblais sous dalle dépend du positionnement du point d'observation par rapport aux limites de dalle et à la source.



Les périodes et durées des différents suivis réalisés n'ont pas permis de mettre en évidence l'influence de la pluie sur l'augmentation des concentrations comme cela a pu être identifié dans le projet FLUXOBAT (Traverse et al. 2013).

A l'échelle des campagnes réalisées, la saturation en eau des terrains hors bâtiment augmente lors la campagne 3, à la différence des campagnes 2 et 4. Cette augmentation de la saturation hors bâtiment lors de la campagne 3 (et donc l'augmentation de la pression motrice des gaz dans les sols sous bâtiment) peut être à l'origine des modifications de l'influence du vent par rapport aux campagnes 2 et 4, comme cela est évoqué aux §3.2.2.

### 3.2.4 Influence de la pression atmosphérique

#### 3.2.4.1 Préambule

Les tendances anticycloniques ou dépressionnaires se traduisent par une augmentation ou une baisse de la pression atmosphérique. Par ailleurs, la pression atmosphérique a tendance à diminuer le soir par suite du réchauffement de la journée et à augmenter la nuit et le matin, cela est généralement davantage visible l'été. Ces variations peuvent présenter également des cycles de 12 heures liés aux positions réciproques du soleil et de la lune.

La variation de pression atmosphérique peut non seulement modifier les écoulements dans la zone non saturée mais également modifier les transferts vers l'air, ces incidences dépendent de la localisation de la source de pollution, de la lithologie, de la nature et de la perméabilité du recouvrement de surface... Concernant l'influence de la variation de pression atmosphérique sur les transferts de polluant du sol vers l'air intérieur, plusieurs auteurs ont mis en évidence l'importance de ces phénomènes dans l'instationnarité des transferts (Robinson, 1997, Kojima et Nagano, 2000, Nazaroff, 1985, Auer et al. 1996, Parker, 2003, Tillman et al. 2005, Yu et al. 2009). Yu et al. (2009) modélisent des variations théoriques des concentrations dans l'air intérieur pouvant varier jusqu'à un ordre de grandeur.

#### *Enseignements de la modélisation*

Dans le contexte du site atelier, pour les gaz du sol, les travaux de modélisation numérique mettent en évidence une incidence théorique des variations de pression sur les concentrations en polluants dans les gaz du sol. Quand la dalle est perméable, la corrélation est inverse (une dépression augmente les concentrations sous dalle) tandis qu'en présence d'une dalle moins perméable la corrélation (positive ou négative) dépend du positionnement du point de mesure par rapport à la source et aux bords de la dalle du bâtiment.

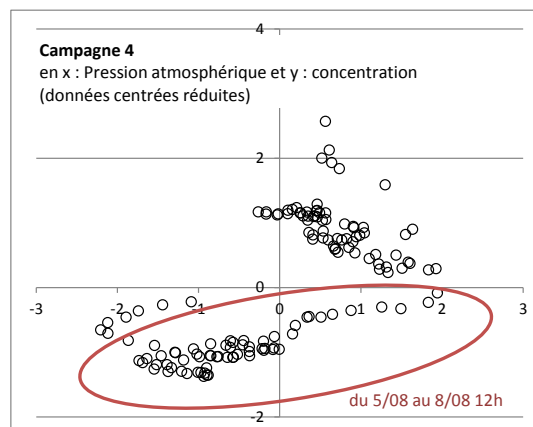
#### 3.2.4.2 Tendances et cyclicité observées

##### Variations diurnes

Les cycles journaliers de pression atmosphérique visibles sur la majorité des chroniques mesurées présentent une augmentation la nuit et le matin.

Les analyses graphiques et statistiques conduites montrent des corrélations les plus significatives (positives) pour les campagnes 2a et 4 (premières périodes sur la Figure 26).

Lors de la campagne estivale 4, jusqu'au 8 août, les concentrations sont significativement corrélées à la dépression entre les gaz du sol et l'air intérieur ( $r^2=0,4$ ). Les variations journalières de cette dépression sont induites par les variations de la température (voir §3.2.1) mais également par les variations de la pression atmosphérique ( $r^2=0,6$ ).



##### Variations pluri-journalières

Par ailleurs, la pression atmosphérique présente des tendances plus longues spécifiques à chacune des campagnes. Lorsque la tendance n'est pas perturbée par plusieurs épisodes de croissance et de décroissance, la corrélation semble :

- négative ou non significative pour les campagnes 1, 2a et 3.
- positive pour la campagne 2b et la campagne 4. Cependant, pour la campagne 2, l'augmentation continue de la concentration dans l'air intérieur est davantage corrélée à la stabilité de la dépression augmentée sur cette période ( $r^2=0,6$ ) et aux conditions atmosphériques très stables (vents faibles, absence d'ensoleillement, humidité relative de l'air élevée) qu'aux variations de pression atmosphérique ( $r^2=0,3$ ).

Pour la campagne estivale (4) l'augmentation de la pression atmosphérique la nuit du 8 août (+10 hPa) peut initier l'augmentation de concentration dans l'air intérieur dont l'évolution ultérieure semble davantage liée à la stabilité de la dépression (en moyenne de 0,7 Pa) générée par d'autres facteurs (voir § 3.2.1).

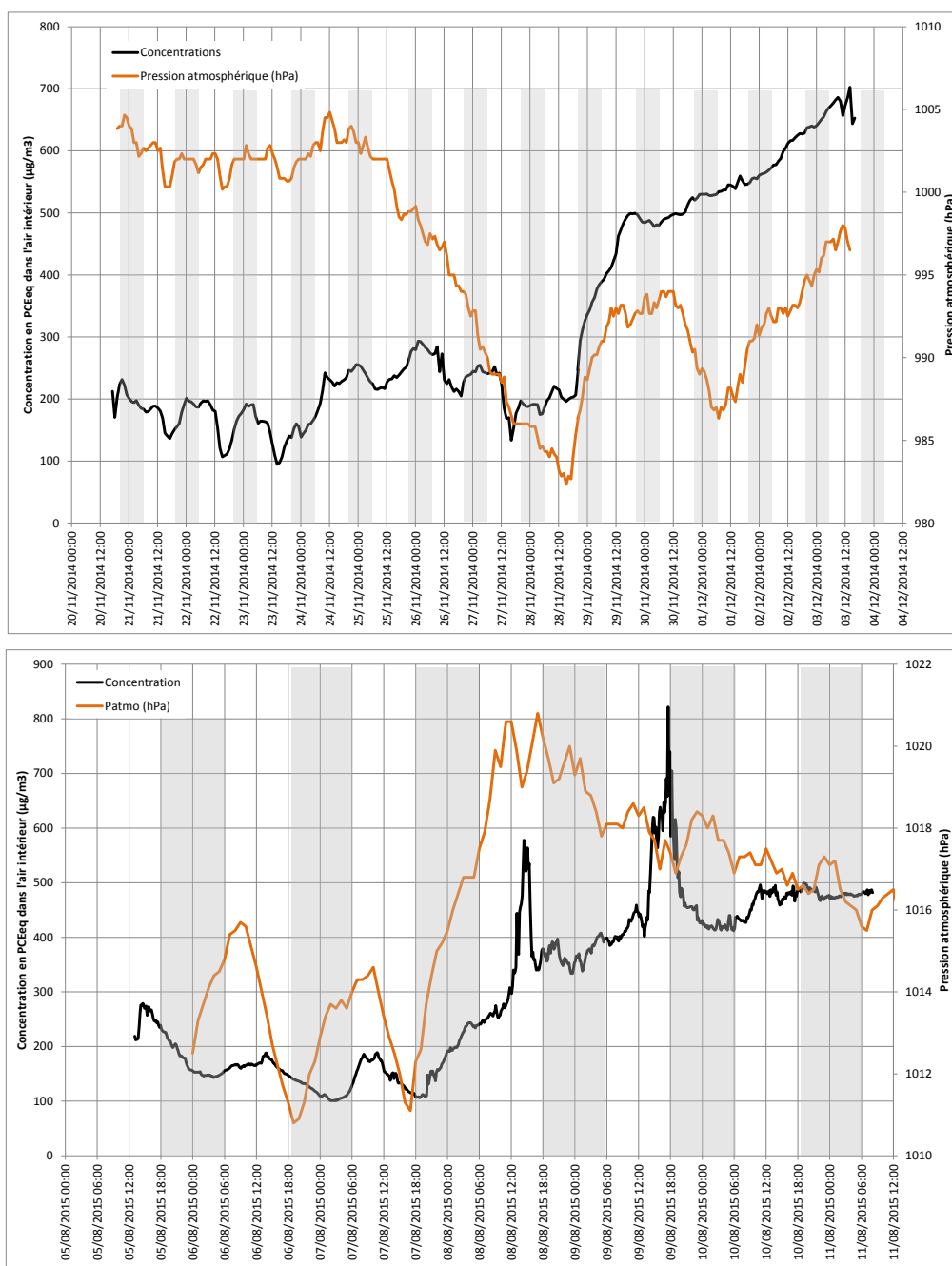


FIGURE 26 – PRESSION ATMOSPHERIQUE ET CONCENTRATION DANS L'AIR INTERIEUR LORS DES CAMPAGNES 2 ET 4

### 3.2.5 Cycles diurnes et stabilité atmosphérique

#### 3.2.5.1 Préambule

Aucune référence de l'impact des cycles diurnes sur les concentrations en COV dans l'air intérieur provenant d'une source dans le sol n'a été recensée dans la littérature. Pour le radon, plusieurs auteurs ont mis en évidence des cycles de 24 h dans les évolutions d'activité volumique dans l'air intérieur. Rydock et al. (2001) ont mis en évidence dans une école une activité volumique significativement plus importante la nuit, tandis que Prettyman (2014) et Ching-Jiang Chen et al. (1996) ont mesuré des activités volumiques maximales tôt le matin et minimales en fin de journée. Dans le cadre du projet TEMPAIR, ont été observées lors de certaines périodes une cyclicité de 24 h des concentrations en PCE dans l'air intérieur. Nous avons cherché à les corrélérer avec les variations cycliques des conditions météorologiques à l'échelle pour la majorité des campagnes (vent, humidité, température extérieure et différence de température intérieure – extérieure).

Ces variations cycliques des conditions météorologiques peuvent être associées à la stabilité atmosphérique. La nuit, le refroidissement marqué de la surface du sol et de l'air à son contact le rend plus dense que l'air des couches supérieures. L'air situé plus haut est plus chaud que l'air inférieur et le vent généralement faible réduit la dispersion verticale de l'air (et des polluants). Ces conditions généralement nocturnes d'inversion du gradient thermique, sont donc associées à une forte stabilité de l'air. La nuit se traduit également par des vents plus faibles et une humidité de l'air plus élevée. On notera que les situations anticycloniques sont également favorables à la stabilité de l'air.

Le jour, le réchauffement progressif du sol sous l'effet du soleil brise cette inversion. On observe le jour une augmentation de la température proche du sol, l'augmentation de l'amplitude du vent et une baisse de l'humidité relative. L'instabilité associée favorise la dispersion verticale des panaches. Il est à noter que d'autres facteurs, comme l'évaporation, l'humidité atmosphérique et le mouvement des masses d'air, interviennent pour modifier et compliquer ces processus.

#### 3.2.5.2 Tendances et cyclicité observées

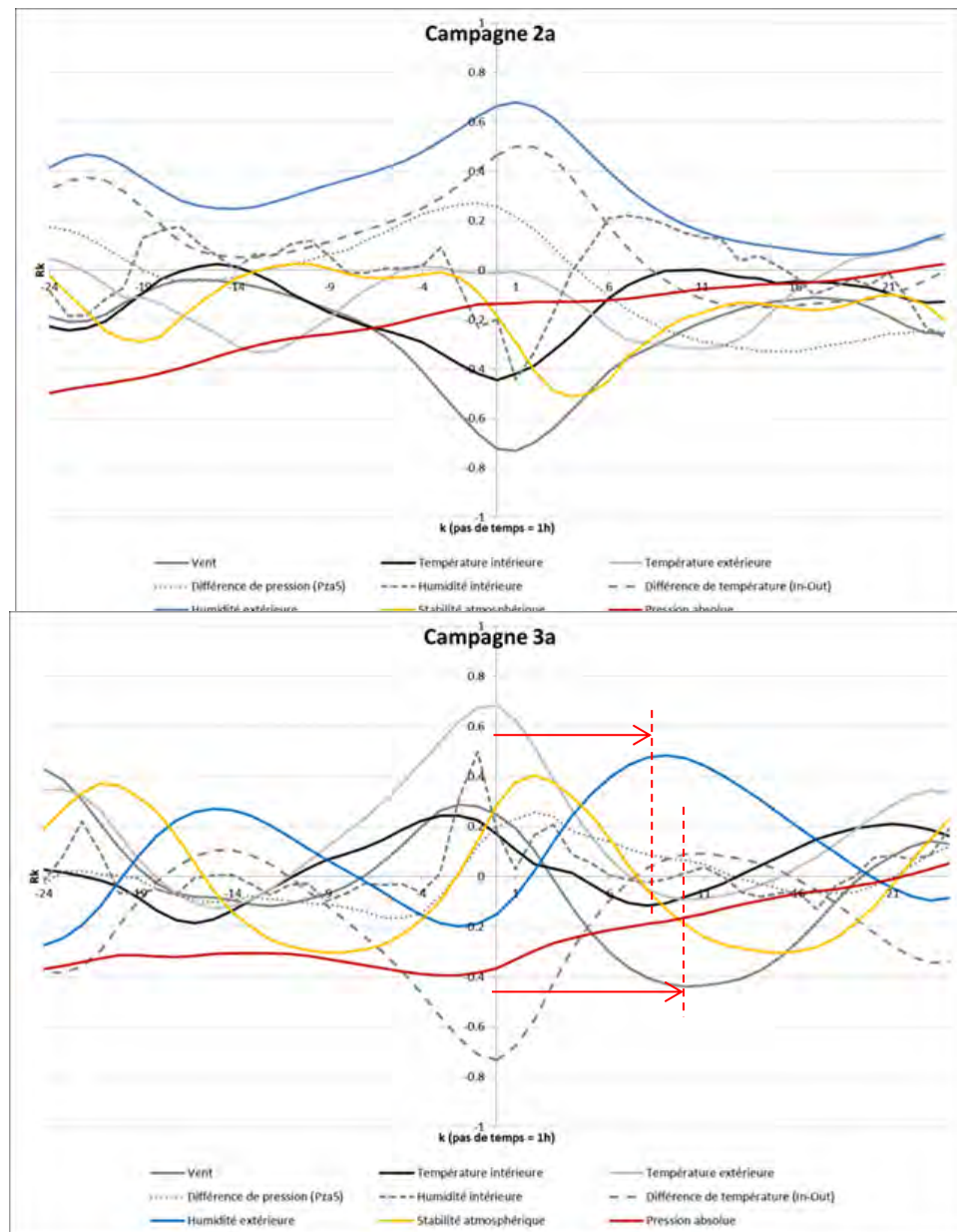
##### Variations diurnes

Les campagnes réalisées ont mis en évidence à certaines périodes une cyclicité des concentrations dans l'air intérieur sur des périodes de 24 heures. Les amplitudes des variations sont en moyenne d'un facteur 1,5 à 2, elles sont observées tant pour les campagnes hivernales que pour la campagne estivale. Deux types de cyclicité sont observés :

- Les périodes durant lesquelles les concentrations augmentent et diminuent durant la journée et sont en moyenne plus élevées en journée que la nuit (campagne 3 et 4). Ces évolutions ne sont pas corrélées avec la dépression entre les gaz du sol et l'air intérieur pour la campagne 3 (hivernale) mais corrélés positivement aux vents et à la température extérieure tandis que pour la campagne 4 (estivale), ces cycles sont corrélés à la dépression, elle-même corrélée à la pression atmosphérique (voir § 3.2.4) ;
- la campagne 2 durant laquelle les concentrations ont tendance à augmenter le soir et la nuit avec un maximum atteint durant la nuit ou le matin et une décroissance durant la journée. Cette évolution a été observée par Prettyman (2014) et Ching-Jiang Chen et al. (1996) pour le radon. Sur les 3 jours où ce phénomène est observé, les concentrations sont corrélées négativement avec le vent ( $r^2=0,8$ ) et positivement avec l'humidité extérieure ( $r^2=0,6$ ), la différence de température intérieur-extérieur ( $r^2=0,5$ ), la pression atmosphérique ( $r^2=0,6$ ) et la dépression ( $r^2=0,5$ ).

Afin d'interpréter la cyclicité observée des concentrations en PCE dans l'air intérieur pour certaines campagnes, l'analyse des séries temporelles des 2 campagnes en période de chauffage a été menée (campagne 2a du 20 au 28/11/14 et 3 du 23/03 au 1/04/15). Le résultat en Figure 27 présente les corrélogrammes croisés entre la concentration en PCE et les variables météorologiques. Le corrélogramme croisé exprime la variation du coefficient de corrélation calculé entre les deux séries suivant un pas de temps de plus en plus grand. Il donne des informations sur l'importance des relations les deux séries (degré de corrélation suivant une période) et permet d'apprécier l'existence d'un éventuel décalage temporel entre celles-ci.

Dans la figure ci-dessous apparaissent les classes de stabilité de Pasquill intégrées à l'analyse (1 : stable, 2 : neutre et 3 : instable). On observe qu'elles ne permettent pas d'expliquer les raisons des comportements cycliques différents lors des campagnes 2a et 3. En effet les conditions usuelles (stables la nuit et instables en journée) sont mises en évidence pour ces deux campagnes et corrélées soit positivement, soit négativement avec la concentration.



**FIGURE 27 - CORRELOGRAMMES CROISÉS DES SUIVIS DE CONCENTRATION DANS L'AIR INTÉRIEUR ET DES VARIABLES MÉTÉOROLOGIQUES (NOV 14 ET MARS 15)**

Le corrélogramme de la campagne 2 met en évidence l'absence de décalage significatif entre les variations de concentrations météorologiques et les concentrations. En effet la corrélation la plus importante est identifiée au temps 0, voire 1 à 2 heures après. Cette représentation confirme les corrélations estimées à partir des coefficients de Pearson. Pour la campagne 3, les corrélations les plus importantes sont, pour la majorité des variables, identifiées sans décalage temporel significatif, seuls le vent et l'humidité extérieure présentent une corrélation plus élevée 8 à 10 heures après. Le fait que ce décalage ne concerne pas de manière conjointe l'ensemble des variables (en particulier la température n'est pas concernée) fragilise fortement l'interprétation. Ainsi, il n'apparaît pas pertinent de considérer que ce soit un retard de l'effet des variations des conditions météorologiques sur celles des concentrations qui expliquerait les périodes auxquelles les concentrations sont maximales dans l'air intérieur.

#### Variations pluri-journalières

Lors de deux campagnes, il est observé une augmentation de la ligne de base des concentrations dans l'air intérieur sur plusieurs jours masquant les variations cycliques étudiées ci-avant. Ces périodes sont visibles en Figure 21 : campagne 2 i) du 24 au 27/11/14 et ii) du 29 au 3/12/14 et campagne 4 du 8 au 11/08/15.

Les augmentations de concentrations sont significatives pouvant atteindre un facteur 7.

Les phénomènes météorologiques intervenant dans l'explication de ces augmentations sont l'absence ou le faible ensoleillement en journée et ainsi une plus faible température, une humidité extérieure élevée en journée. Cette situation présente plusieurs jours de suite, associée aux vents relativement faibles, conduit à des conditions particulièrement stables limitant la dispersion atmosphérique des pollutions.

Parallèlement, les températures extérieures plus faibles conduisent à une augmentation du gradient thermique et de la dépression entre les sols et l'air intérieur. L'augmentation des concentrations est donc également à relier à l'augmentation des transferts de polluants des sols vers l'air intérieur (voir §3.2.1).

### 3.3 Recommandations

Des travaux réalisés, il ressort l'influence significative de l'ensemble des variables dans l'explication des variations de concentrations dans l'air intérieur de polluants provenant du sol. Les effets synergiques et antagonistes de ces variables et le fait que le système étudié présente une forte dynamique rendent délicate leur analyse différenciée. Les variables hydro-météorologiques nécessaires à l'interprétation qu'il est recommandé d'acquérir durant les campagnes sont :

- les variables usuellement acquises : la température et l'humidité relative à la fois en intérieur et en extérieur, la pression atmosphérique et l'amplitude du vent ;
- la pluie sur la période de mesure et le niveau de nappe avec a minima une mesure avant et après la campagne ;
- les variables peu intégrées actuellement aux suivis à savoir : le gradient thermique entre l'air intérieur et extérieur (calculé des températures mesurées), l'ensoleillement et la direction du vent.
- Compte tenu de la complexité de la mesure, si elle ne peut être recommandée dans tous les contextes, la mesure de la dépression entre l'air intérieur et les gaz du sol ou entre l'air intérieur et l'air extérieur peut être pertinente. Les travaux réalisés ont en effet montré qu'elle apporte un élément majeur dans l'interprétation de la variabilité des concentrations dans l'air intérieur.

Certaines de ces variables doivent être acquises sur site (en particulier celles liées à l'environnement intérieur) tandis que d'autres peuvent l'être auprès d'une station météorologique.

Les travaux réalisés dans TEMPAIR montrent que les interprétations de l'influence des paramètres hydro-météorologiques et de chauffage n'auraient pu être conduites sans la compréhension des transferts de la pollution gazeuse dans le milieu souterrain et l'historique de pluie. Cela conduit à recommander lors de campagnes de la qualité de l'air intérieur en plus des éléments liés aux activités dans les espaces bâtis, des conditions de ventilation et de chauffage :

- la connaissance de la pollution dans le milieu souterrain et de ses transferts. Ceci repose sur la caractérisation du panache de pollution, de la succession lithologique et lors des mesures de concentration dans l'air intérieur, la réalisation de mesures de concentrations également dans les gaz du sol idéalement sous la dalle<sup>13</sup> (ou dans les zones de transfert : vide sanitaire, cave...) ou encore dans des ouvrages situés à proximité immédiate ;
- la connaissance des conditions météorologiques passées, lesquelles peuvent avoir une influence significative sur la géométrie du panache de pollution et les transferts dans la zone d'influence de la dépression du bâtiment.

Considérant la variabilité temporelle mise en évidence, des recommandations sur les durées et périodes de mesures pour la caractérisation des concentrations dans l'air intérieur sont proposées ci-dessous. Elles pourront être adaptées en fonction de l'objectif de la mesure de concentration (premier diagnostic, évaluation de l'exposition, dimensionnement de travaux,...) :

- Conduire des mesures sur des périodes les plus longues possibles (la variabilité pluri-journalière mise en évidence dans le projet a pu atteindre un facteur 7). Actuellement, les dispositifs passifs usuels pour la quantification des COV dans l'air ne permettent cependant pas de dépasser 7 ou 15 jours de mesure en fonction des polluants. La présence de sources domestiques de COV liées aux activités dans les bâtiments peut conduire à limiter la durée de mesure de manière à les maîtriser ;

<sup>13</sup> Dans ce cas, il sera important de maîtriser l'étanchéité du rebouchage du point de prélèvement. On pourra se référer aux recommandations du guide BRGM-INERIS (2016)

- Conduire a minima **trois campagnes de mesures en conditions contrastées avec a minima une campagne en conditions hivernales** où le gradient thermique et donc la dépression entre les gaz du sol et l'air intérieur conduisent à augmenter significativement les concentrations ;
- Enfin, la cyclicité journalière des concentrations mise en évidence, bien qu'inférieure aux variations pluri-journalières sur le site atelier du projet TEMPAIR peut amener dans certains contextes à adapter les périodes de prélèvement. Par exemple, dans le cas de locaux utilisés uniquement en journée, il peut être pertinent pour mieux apprécier les expositions de conduire des prélèvements séquentiels sur les horaires de présence des populations. Cette adaptation est d'autant plus importante en présence d'un asservissement de la ventilation à la présence des occupants ou d'une modulation en fonction des horaires de fréquentation.

## 4. Conclusions

Les travaux présentés dans ce document ont été initiés suite au projet FLUXOBAT dans l'objectif d'approfondir les raisons de la variabilité temporelle des concentrations dans les gaz du sol et dans l'air intérieur sur un site atelier présentant une pollution majoritaire en tétrachloroéthylène dans les sols (zone non saturée et saturée). Les facteurs d'influence étudiés sont les conditions hydro-météorologiques (niveau de nappe, pression atmosphérique, vent, température,...) et les conditions associées au bâtiment (dépression, gradient thermique, renouvellement d'air).

### Gaz du sol

Ces travaux montrent une forte variabilité temporelle des concentrations dans les gaz du sol avec, tant sous bâtiment qu'en dehors, des amplitudes pouvant atteindre plusieurs ordres de grandeur. Les variations ont été observées à 3 échelles : variations mensuelles, pluri-journalières et diurnes.

Les variables pour lesquelles une corrélation est significative sont la température à travers les variations saisonnières, la pluie et la modification des pressions motrices dans la zone non saturée, le vent et dans une moindre mesure les variations de température et d'humidité relatives suivant des cycles jours/nuit. Les influences des différentes variables que sont la température, la pluie, le niveau de nappe, la pression atmosphérique, le vent et l'humidité relative n'ont pu cependant être discriminées dans les mesures réalisées. La modélisation numérique 2D du site atelier considérant une chronique de pluie, de pression atmosphérique et de niveau de nappe sur une durée de un an a mis en évidence l'influence théorique de chacune de ces variables et les effets antagonistes ou synergiques lors de certains épisodes. Ces résultats montrent d'une part la difficulté d'interpréter les variations de concentrations et d'autre part la nécessité de prendre en compte de manière conjointe l'ensemble des variables d'influence.

Des recommandations sont formulées quant à l'acquisition de ces variables et leur interprétation. Si les variables à acquérir sont cohérentes avec celles formulées dans le guide BRGM-INERIS (2016) ou FLUXOBAT (2013), nous estimons que l'interprétation de leur influence ne peut être généralisée car elle dépend de nombreux facteurs qu'il convient d'intégrer au travers de l'analyse spécifique du fonctionnement du système étudié.

### Air intérieur

Dans l'air intérieur, les campagnes de mesure réalisées mettent en évidence des variations pouvant atteindre un ordre de grandeur. Les variations sont observées à 3 échelles : variations saisonnières, pluri-journalières et diurnes. Il est important de noter que sur des bâtiments occupés, des variations complémentaires associées aux pratiques des usagers (ouvertures de fenêtres, modulation de la ventilation ou du chauffage) viendront amplifier les variations.

Sur le site étudié, les concentrations dans l'air intérieur sont corrélées à l'ensemble des variables que sont le vent, la température intérieure et extérieure, le gradient thermique int-ext, la différence de pression int-ext, la pression atmosphérique et l'humidité relative intérieure et extérieure. Il a également été mis en évidence l'absence de lien univoque entre les concentrations et chacune des variables météorologiques, avec des corrélations positives sur certaines campagnes et négatives sur d'autres. Seule la dépression du bâtiment vis-à-vis des gaz du sol présente sur toutes les campagnes une corrélation positive (elle n'est cependant pas toujours significative).

Les travaux réalisés dans TEMPAIR montrent que les interprétations de l'influence des paramètres hydro-météorologiques et de chauffage n'auraient pu être conduites sans la compréhension des transferts de la pollution gazeuse dans le milieu souterrain et l'historique de pluie. Cela conduit à recommander l'acquisition lors de campagnes de la qualité de l'air intérieur, en plus des éléments liés aux activités dans les espaces bâtis, des conditions de ventilation et de chauffage et des conditions météorologiques, des concentrations dans les gaz du sol et/ou les lieux de transfert. Comme pour les gaz du sol, la compréhension des transferts potentiels et de leur dynamique à travers un schéma de fonctionnement intégrant ces éléments est recommandée. Enfin, les recommandations sur les durées et périodes de mesures pour la caractérisation des concentrations dans l'air intérieur proposée à l'issue du projet TEMPAIR sont cohérentes avec elles formulées dans le guide BRGM-INERIS (2016) et FLUXOBAT (2013).

### Perspectives

Pour la caractérisation des concentrations en COV dans l'air intérieur, des travaux de développement sur les échantillonneurs semblent nécessaires afin de réduire les incertitudes associées à la représentativité temporelle des concentrations mesurées.

Vis-à-vis de la variabilité temporelle des concentrations dans les gaz du sol et des débits massiques vers l'air intérieur liées aux conditions météorologiques, parce qu'elles sont dépendantes de la localisation de la source, de la perméabilité de l'interface bâtie et des caractéristiques lithologiques des sols, des travaux permettant d'aider les prestataires dans l'anticipation et l'interprétation de cette variabilité paraissent nécessaires.

Enfin, le nombre de campagnes de mesures étant généralement limité, la question de la prise en compte de la variabilité temporelle des concentrations dans les gaz du sol et dans l'air intérieur est posée, en particulier dans le cadre des évaluations de risques réalisées dans les démarches IEM ou plan de gestion], il est suggéré qu'une méthodologie commune aux gaz des sols et à l'air intérieur soit recherchée afin de limiter les incertitudes associées.



## 5. Références consultées

- ADEME, 2013. ATTENA, Mode Opérateur – Apports et limitations de l'analyse des gaz du sol 2013
- ADEME, 2013a. CITYCHLOR - Technical Report - Soil-gas monitoring: soil-gas well designs and soil-gas sampling techniques / Caracitychlor (2013) - Caractérisation et suivi des gaz du sol design des ouvrages permanents (piézaires) et techniques de prélèvement). INERIS ; <http://www.citychlor.eu/>
- ADEME, 2013b. CITYCHLOR - Technical Report : Characterization of indoor ambient air quality in relation to potential soil pollution by volatile and semi-volatile chemicals. INERIS Accessible sur <http://www.citychlor.eu/>
- AFNOR (2006) Norme NF ISO10381-7. Qualité du sol - Échantillonnage - Partie 7 : lignes directrices pour l'échantillonnage des gaz du sol ; travail de révision en cours
- AFNOR (2011) Norme NF X 31-620 :2011. Qualité du sol – prestations de services relatives aux sites et sols pollués (études, ingénierie, réhabilitation de sites pollués et travaux de dépollution). Révision de juin 2011
- Auer LH, Rosenberg ND, Birdsell KH, Whitney EM (1996). The effects of barometric pumping contaminant transport. *Journal of contaminant hydrology* 24 (1996)
- Bakker J., Lijzen J.P.A., van Wijnen H.J. (2008). Site-specific human risk assessment of soil contamination with volatile compounds. RIVM report no. 711701049, 140 p
- Bekele Dawit N, Naidu R, Chadalavada S. (2014). Influence of spatial and temporal variability of subsurface soil moisture and temperature on vapour intrusion. *Atmospheric Environment* 88 (2014).
- 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
- Ching-Jiang Chen, Chi-Chang Liu, Yu-Ming Lin (1996) Diurnal variation of radon progeny in indoor and outdoor air of a subtropical city. *Environment International*. The natural Radiation Environment VI. Vol 22, 1996
- Folkes, D., Kurtz, J., and C. Sanpawanitchakit. (2007). Vapor intrusion as a function of lateral distance from a groundwater plume boundary. In *Proceedings of AWMA Conference on Vapor Intrusion: Learning from the Challenges*, September 26–28, Providence, Rhode Island, Pittsburgh, Pennsylvania: AWMA. 143–159.
- Folkes D, Wertz W, Kurtz J, Kuehster T (2009). Observed spatial and temporal distributions of CVOCs at Colorado and New York vapor intrusion sites. *Ground water monitoring and remediation* 29 n°1 (winter 2009)
- Hers I and Southwood J. (2006). *Guidance on Site characterization for evaluation of soil vapour intrusion into buildings*, Science Advisory Board for Contaminated Sites in British Columbia, 2006
- Hulot C. (INERIS), Traverse S. (BURGEAP), Richez F. (INERIS), Gleize T. (BURGEAP), 2017. Projet TEMPAIR – partie 2. Evaluation des échantillonneurs passifs pour le PCE dans les gaz du sol. Mars 2017
- Kojima and Nagano (2000) Dependence of barometric pressure, wind velocity and temperature on the variation of radon exhalation. *International Radon symposium*, 2000.
- Lowell, P. S. and Eklund, B. (2004), VOC emission fluxes as a function of lateral distance from the source. *Environ. Prog.*, 23: 52–58. doi: 10.1002/ep.10007
- Marzougui Jaafar S. (2013). Mémoire de doctorat Transfert de composés organo-chlorés depuis une zone source localisée en zone non saturée d'un aquifère poreux vers l'interface sol-air : expérimentations et modélisations associées. Université de Strasbourg. Janvier 2013
- Massmann J., Ferrier D.F.(1992). Effects of atmospheric pressures on gas transport in the vadose zone. *Water Resour. Res.* 28 (3), 777–791.
- Millington (1959) Gas Diffusion in Porous Media, *Science*, (1959), Vol. 130, 100-102

- Millington & Quirk (1961) - Permeability of Porous Solids, *Trans. Faraday Soc*, 57, (1961), 1200-1207
- Nazaroff William W., Feustel H., Nero Anthony V., Revzan K. L. and Grimsrud D. T. (1985) Radon transport into a detached one-story house with a basement. *Atmospheric Environment*, vol. 19 (1), pp. 31-46.
- Parker J. C. (2003) Modelling volatile chemical transport, biodecay, and emission to indoor air, *Ground Water Monitoring and Remediation*, vol. 23, issue 1, pages 107-120
- Pasquill F. (1961). The estimation of the dispersion of windborne material, *The Meteorological Magazine*, vol 90, No. 1063, pp 33-49
- Prettyman Richard (2014) Observations on diurnal indoor variations in gamma ray count rates. <http://www.uradmonitor.com/wordpress/wp-content/uploads/2014/08/observations-on-diurnal-indoor-variations-in-gamma-ray-count-rates-v1.1.pdf>.
- Qi Shaoying, Hay K James, Cal ark P., 2000. Predicting humidity effect on adsorption capacity of activated carbon for water-immiscible organic vapors. *Advances in Environmental Research* 4 (2000) 357-362
- Rivett M.O. et al (2011) Review of unsaturated-zone transport and attenuation of volatile organic compound (VOC) plumes leached from shallow source zones. *Journal of Contaminant Hydrology* 123 (2011) 130–156
- Riley, Robinson, Gadgil and Nazaroff (1999). Effects of variable wind speed and direction on radon transport from soil into buildings : model development and exploratory results. *Atmospheric environment* vol 33.
- Riley, Gadgil, Bonnefou and Nazaroff (1996). The effect of teady winds on radon-222 entry from soil into houses. *Atmospheric Environment*. Vol 30.
- Robinson, Sextro and Fisk (1997). Soil-gaz entry into an experimental basement driven by atmospheric pressure fluctuations – measuements, psectral analysis and model comparison. *Atmospheric Environment* vol 31.
- Rydock JP, Naess-Rolstad A, Brunsell JT (2001) Diurnal variations in radon concentrations in a school and office : implications for determining radon exposure in day-use buildings. *Atmospheric Environment*. Volume 35, juin 2001
- SERDP (2014). Vapor intrusion from entrapped NAPL sources and groundwater plumes : process understanding and improved moeling tools for pathway assessment. Final report. SERDP Project ER-1687. July 2014. *Authors : Illangasekare T, Petri B, ...*
- Sharan and Kumar (2009). An analytical model for crosswind integrated concentrations released from a continuous source in a finite atmospheric boundary layer. *Atmospheric Environment* vol 43.
- Shen R, Pennel KG, Suuberg EM (2012) A numerical investigation of vapor intrusion – the dynamic response of contaminant vapor to rainfall events. *Science of total Environment* 437 (2012)
- Tillman FD, Waever JW (2007) Temporal moisture content variability beneath and external to a building and the potentiel effects on vapor intrusion risk assessment. *Science of total Environment* 379 (2007)
- Tillman, F.D. et Weaver, J.W. (2005). Review of recent research on vapour intrusion, Washington, DC: U.S. EPA, Office of Research and Development, EPA/600/R-05/106.
- Traverse S., Schäfer G., Chastanet J., Hulot C., Perronnet K., Collignan B., Cotel S., Marcoux M., Côme J.M., Correa J., Quintard M., Pepin L. (2013) - Projet FLUXOBAT, Evaluation des transferts de COV du sol vers l'air intérieur et extérieur. Guide méthodologique. Novembre 2013. 257 pp. Accessible sur [www.fluxobat.fr](http://www.fluxobat.fr)
- Traverse S. (BURGEAP), Hulot C., (INERIS) Gleize T. (BURGEAP), Richez F. (INERIS), Dorffer L. (BURGEAP), 2017. Projet TEMPAIR – partie 3. Prélèvement des gaz du sol : impact de filtres anti-humidité sur l'adsorption de PCE & TCE sur charbon actif et impact de la purge préalable au prélèvement. Mars 2017
- Wang X, Unger AJA, Parker BL (2012) simulating an exclusion zone for vapor intrusion of TCE from groundwater into indoor air. *Journal of contaminant hydrology*
- Werner, 1985. Predictive models for gaseous-phase carbon adsorption and humidity effect. Southeastern center for electical engineering education Inc.
- Yaws CL (1999) Chemical properties handbook : physical, thermodynamic, environmental, transport, safety and health related properties for organic and inorganic chemicals. McGraw-Hill Editions, New York
- Yu S, Unger AJA, Parker B (2009) Simulating the fate and transport of TCE from groundwater to indoor air. *Journal of contaminant hydrology* 107 (2009).

## L'ADEME EN BREF

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

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

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

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)