



# Emission de polluants gazeux dans les bâtiments à partir d'un sol pollué : comparaison mesures sur sites et modélisations

Corinne Hulot, Benoît Hazebrouck, Guillaume Gay, Franck Marot

## ► To cite this version:

Corinne Hulot, Benoît Hazebrouck, Guillaume Gay, Franck Marot. Emission de polluants gazeux dans les bâtiments à partir d'un sol pollué : comparaison mesures sur sites et modélisations. 2. Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, Oct 2009, Paris, France. ADEME Editions. Angers, pp.NC, 2009. <ineris-00973364>

**HAL Id: ineris-00973364**

**<https://hal-ineris.ccsd.cnrs.fr/ineris-00973364>**

Submitted on 4 Apr 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

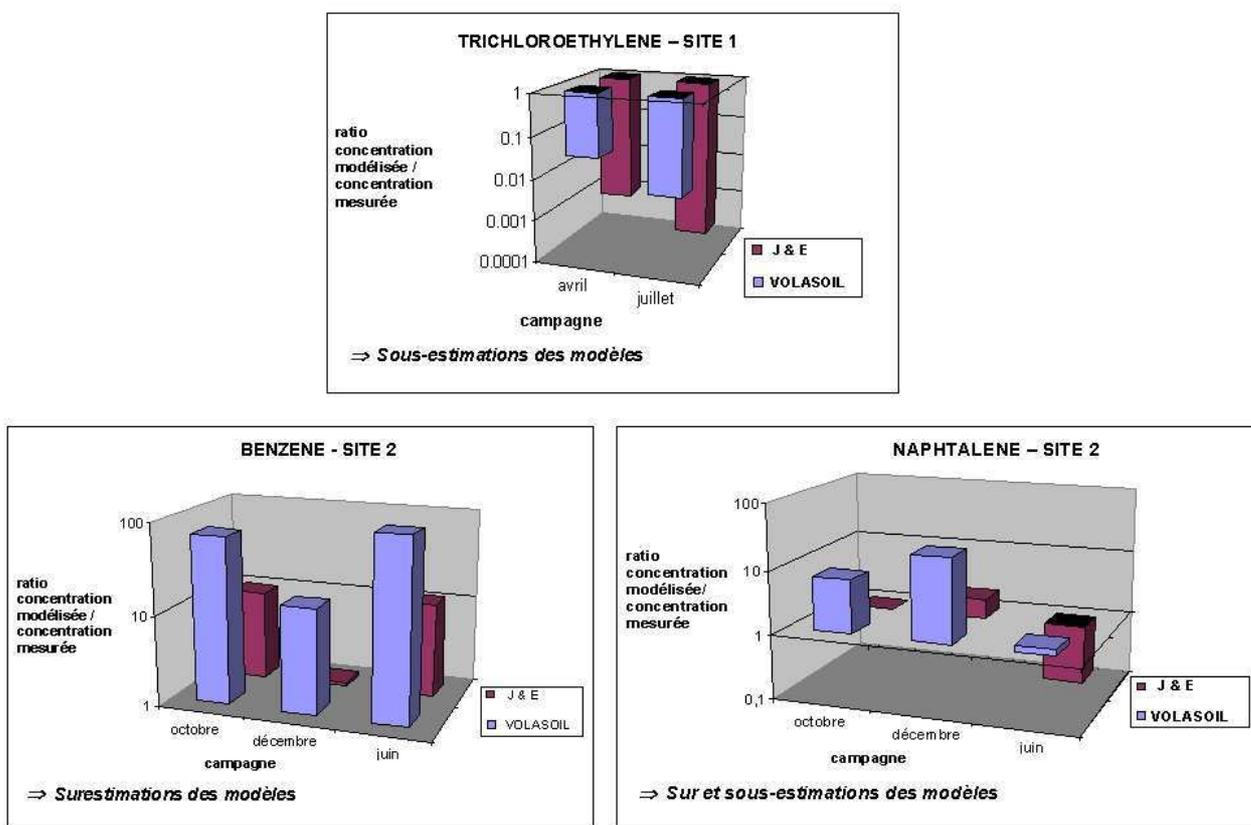


Les calculs des concentrations dans l'air ambiant ont été conduits par le biais de deux modèles recodés par l'INERIS, l'un basé sur les équations de VOLASOIL (Waitz *et al.*, 1996) adapté par l'INERIS aux spécificités des sites étudiés (modèle multicouche pour dalle de fondation sans vide sanitaire ni cave ; Hazebrouck *et al.*, 2005) et l'autre sur les équations de Johnson & Ettinger (1991).

Les concentrations modélisées dans l'air ambiant intérieur des bâtiments diffèrent significativement des concentrations mesurées dans l'air ambiant, jusqu'à atteindre plusieurs ordres de grandeur en terme de sous- ou surestimation (figure 2). A ce jour aucune tendance globale ne se dessine selon le modèle retenu, la typologie du site ou les caractéristiques des substances étudiées.

Les paramètres les plus sensibles dans les modélisations dépendaient du modèle utilisé (cf. conceptualisation différente des phénomènes pris en compte). Malgré les mesures réalisées, certaines incertitudes sur les paramètres d'entrée (par exemple, sur la porosité à l'air des sols, la perméabilité des sols) impactaient les concentrations modélisées jusqu'à un ordre de grandeur.

Sur le site 2, le plus favorable au transfert de vapeur (notamment en raison du chauffage du bâtiment durant la période hivernale) et caractérisé de manière plus approfondie, les différences entre les mesures et les modélisations se sont avérées moindres.



**Figure 2 : Résultats d'intercomparaison mesures - modélisations**

Il apparaît nécessaire de continuer ces études de confrontation des mesures et des résultats des modélisations sur des sites présentant des typologies et des contaminations différentes. Ainsi, pour ce transfert, l'étape de vérification des modèles doit encore être poursuivie.

L'exploitation de données pré-existantes sur divers sites contaminés et des expérimentations en laboratoires et en équipements pilotes d'échelle réelle, seront également des voies à explorer.

## **1. INTRODUCTION**

Dans le domaine des sites pollués par des composés organiques volatils, la migration depuis les sols et les eaux souterraines vers l'air ambiant de bâtiments est souvent le principal vecteur d'exposition en termes de risques sanitaires liés à la voie inhalation. La quantification, prédictive et par la mesure, des concentrations dans l'air intérieur des bâtiments, est essentielle pour une gestion des sites pollués protectrice de la santé des personnes. L'évaluation du transfert de substances émises par le sol vers l'air ambiant des bâtiments est entachée encore aujourd'hui d'importantes incertitudes d'un point de vue tant qualitatif que quantitatif. La mesure directe sur le compartiment environnemental d'exposition est à privilégier. Elle doit cependant être pertinente, représentative du site considéré, et basée sur une stratégie d'échantillonnage adaptée, tant au niveau spatial que temporel. De nombreux auteurs traitent des modèles de transfert de vapeurs du sol et/ou de la nappe vers l'air ambiant de bâtiments (liste non exhaustive [1 à 11]). L'état de l'art actuel et le retour d'expérience montrent que ces modélisations peuvent conduire à des évaluations de concentrations dans l'air intérieur d'un bâtiment sous-estimées ou surestimées de plusieurs ordres de grandeur. Cependant la littérature propose principalement des études comparatives purement théoriques de modèles commerciaux, de publications (sur la base des équations mathématiques), sans mesures de terrain des paramètres d'entrée ni des concentrations mesurées dans l'air ambiant [12-13]. D'une façon générale, pour les études comparatives alliant modélisation et mesures de terrain, elles restent souvent globales, notamment en terme de représentativité, principalement en l'absence d'information exhaustive quant aux équations, aux paramètres retenus dans la modélisation, ou aux campagnes de mesures mises en œuvre [14 à 17].

Face à ces incertitudes dans les évaluations quantitatives des expositions et des risques sanitaires, et afin de mettre en place des gestions de sites plus pertinentes, l'étude réalisée par l'INERIS visait à examiner l'efficacité des modèles de transferts existants ou d'un modèle développé par l'INERIS. Pour cela, des concentrations modélisées dans l'air ambiant intérieur de bâtiments ont été comparées avec les mesures de terrain sur deux sites expérimentaux, avec un contrôle approfondi des paramètres sensibles de la modélisation.

Des campagnes de caractérisation de différents paramètres d'entrée des modèles ont été réalisées au droit de deux anciens sites industriels, n°1 et n°2, situés en zone urbaine, comportant un bâtiment, avec respectivement la présence de solvants chlorés et d'hydrocarbures aromatiques et aliphatiques dans les sols.

Le présent article ne présente que des éléments relatifs au site n°2, seuls certains résultats d'intercomparaison de mesures et de modélisations du site n°1 étant rappelés [16].

## **2. METHODOLOGIE GENERALE**

Les concentrations dans l'air ambiant prédites par les modèles choisis dans cette étude ont été comparées à celles mesurées analytiquement dans les bâtiments concernés. Les différents paramètres d'entrée des modèles ont été obtenus soit expérimentalement, soit par le calcul, ou à partir de la littérature. Les étapes décrites ci-après ont été suivies.

- Consultation des études antérieures (historique, diagnostics, etc.) ;
- Réalisation d'investigations complémentaires, visant à caractériser les concentrations et flux dans/entre les différents milieux concernées et les principaux paramètres d'entrée des modèles, dont les caractéristiques physiques des sols et de la dalle de fondation, le taux de ventilation dans le bâtiment, la différence de pression entre le sol et le bâtiment, etc. ;
- Mise en œuvre des modélisations des transferts intégrant les choix paramétriques : paramètres physico-chimiques des substances issus de diverses bases de données, ou via une formule calculatoire ; représentation des sources (sol et gaz du sol), dont leur extension latérale et verticale, concentrations ; paramètres physico-chimiques des sols, issues de diagnostics et le cas échéant de la littérature ; paramètres caractéristiques des bâtiments, issus de mesures sur site et le cas échéant de la littérature [4 ; 8] ;
- Modélisation et la présentation des résultats pour chacun des modèles retenus ;
- Etude d'incertitudes, des études paramétriques ;
- Intercomparaison des résultats des modélisations et des mesures expérimentales.

### **3. PRESENTATION GENERALE DES DISPOSITIFS DE MESURES**

Le déroulement des investigations a comporté la réalisation des étapes suivantes (Figure 1).

- Mesure de flux : deux méthodes de mesure des flux de gaz émis par un terrain, développés par l'INERIS, ont été mises en œuvre : la chambre à accumulation et re-circulation externe [18] et la chambre dynamique à balayage [19].

La chambre à accumulation et re-circulation externe est une chambre carrée de 50 cm de côté, de 20 cm de hauteur (Figure 1-A). Elle est placée à la surface du sol avec une étanchéité latérale, au moyen d'un cordon argileux dans cette étude et accumule les gaz émis par le sol. Un dispositif envoie l'air de la chambre vers l'analyseur (dans le cas présent, un capteur FID), et le réinjecte ensuite dans la chambre. Le suivi de la vitesse d'enrichissement en gaz du mélange re-circulé permet de déduire le flux local de gaz au point considéré. Cette méthode se caractérise par son aspect direct (simple lecture sur site), par sa maniabilité et sa rapidité de mise en œuvre (quelques minutes par point). Le flux de contaminant gazeux est exprimé en flux global relatif équivalent au gaz étalon choisi [18].

La chambre dynamique à balayage est une chambre de dimension 2,5 m x 1 m x 0,15 m reliée à un émetteur de gaz inerte et à un dispositif de sortie équipé de points de prélèvement (Figure 1-B). Elle recueille les gaz émis par le sol au sein d'un flux contrôlé de gaz vecteur inerte. Le mélange ainsi obtenu est analysé en sortie après stabilisation du régime, via un prélèvement sur supports. A partir des paramètres mesurés (concentrations, débit d'air sortant), le débit des vapeurs émises sortant de la chambre peut être déduit, et donc le débit dégagé au travers de la surface couverte. Cette approche permet une quantification précise des différentes substances émises. La dimension de la chambre et les types de mesure conduisent à un maniement relativement lourd de cette méthode et à une fréquence de mesures relativement faible (1 à 3 points de mesure par jour), fonction également des temps de pompage requis par l'analyse au regard des limites de quantification souhaitées [19] ;

- Sondages destinés à des piézomètres ou des puits à gaz : pour les puits à gaz, installés seuls, en doublon ou triplet, les zones de captage des gaz ont été choisies au niveau des zones sources et de transferts présumées ;
- Prélèvements d'échantillon de béton de la dalle et de sols pour analyses chimiques et de paramètres physico-chimiques des sols (fraction en carbone organique, granulométrie, etc.) et du béton ;
- Prélèvements d'air du sol (Figure 1-C) après purge de l'ouvrage, hors prélèvement directement sous la dalle de fondation ;
- Prélèvements d'air ambiant intérieur et extérieur à une hauteur de l'ordre du mètre. (Figure 1-D) ;
- Mesures de la différence de pression entre le sol et le bâtiment avec un appareil de mesure différentielle, présentant avec une limite de détection et une précision de l'ordre d'un Pascal (Figure 1-E) ;
- Mesures des taux de renouvellement d'air, basées sur la mesure de la concentration dans l'air d'un gaz traceur, dans ce cas du SF<sub>6</sub> (hexafluorure de soufre) : l'atmosphère du local étudié a étéensemencée avec le gaz traceur, puis des échantillons d'air prélevés dans l'air ambiant en plusieurs endroits et à deux hauteurs et à des heures connues, puis analysés par chromatographie directement sur le site (Figure 1-F) ;
- Mesures de température ambiante et de pression atmosphérique.

#### 4. INVESTIGATIONS DE TERRAIN SUR LE SITE N°2

Le site n°2 était un ancien site industriel situé en zone urbaine sur lequel la présence de substances de type hydrocarbures (benzène, toluène, etc. et d'hydrocarbures aromatiques polycycliques, notamment le naphthalène, etc.) a été mise en évidence dans les sols sous un bâtiment. Ce dernier était entouré d'autres bâtiments, de zones d'accès bitumées ou bétonnées et de pelouses. Le bâtiment étudié, une grande halle de 32 m de long, 12 m de large et d'une hauteur de 6 m, incluant un bureau et des sanitaires, était construit sur une dalle de fondation en béton, sans vide sanitaire, ni cave. Ce site apportait des opportunités uniques suite à la démolition de ce bâtiment et l'excavation de sols sous-jacents permettant d'affiner la caractérisation des sols (lithologie, granulométrie, etc.) après les mesures de transfert. Ce bâtiment a pu être chauffé en hiver. Cela a permis la réalisation d'une campagne de mesure durant cette période, plus favorable au transfert de vapeur en raison du contraste de températures à l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Trois campagnes de mesures ont été réalisées sur ce site, en octobre, décembre et juin de l'année suivante. La Figure 1 illustre les investigations conduites.

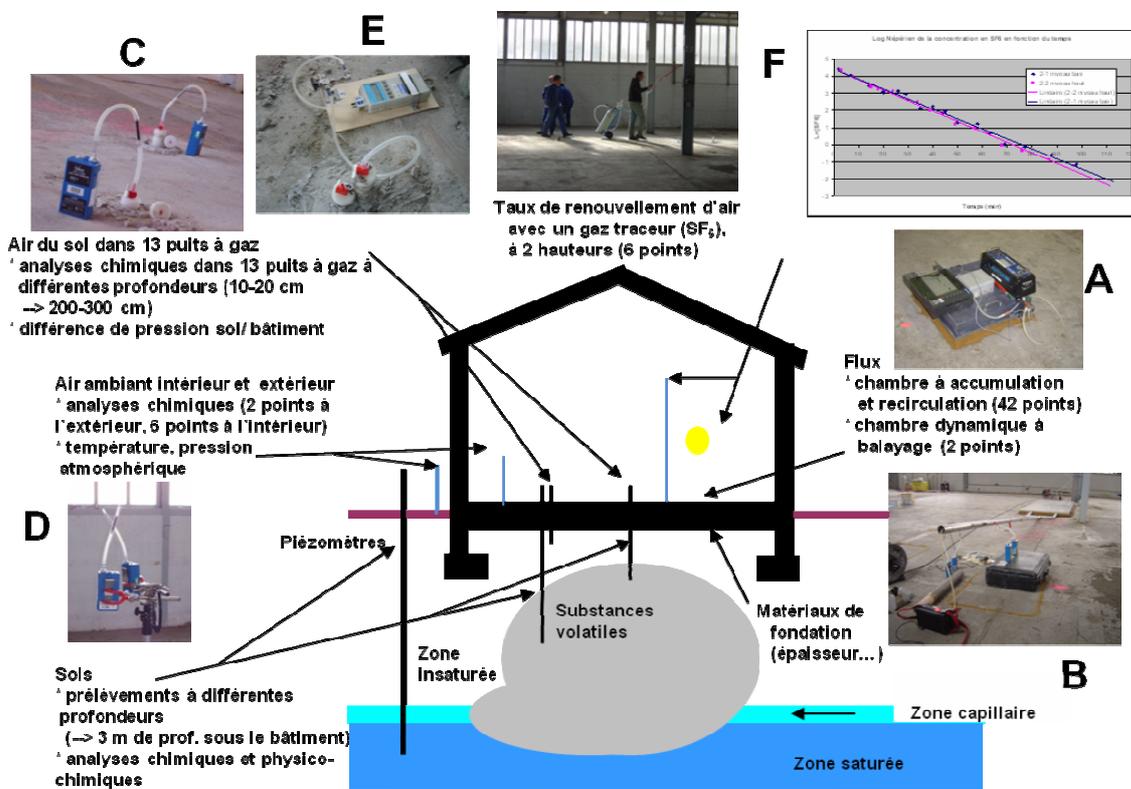


Figure 1 - Investigations de terrain

Elles ont débuté par une campagne avec la chambre à accumulation et re-circulation externe, utilisée pour couvrir toute la superficie du bâtiment, par un maillage régulier de 2 m par 4 m, conduisant à la réalisation d'une quarantaine de points de mesure, centrés en ces mailles. Lors des campagnes d'octobre et de décembre aucun flux n'a été détecté, et ceci même aux endroits où la dalle de fondation (épaisseur moyenne de 20 cm) présentait de nombreuses fissures. Suite à ces résultats, aucune mesure avec ce dispositif n'a été réalisée par la suite. Ce dispositif, devant initialement guider le positionnement de la chambre dynamique à balayage, l'absence de réponse n'avait pas permis d'orienter l'emplacement de cette dernière. Ainsi, les deux emplacements choisis lors de la première campagne d'octobre, ont-ils été localisés au droit de zones de dallage présentant des fissurations et au droit de zones antérieurement identifiées comme contaminées. Au vu des résultats des analyses de sols et gaz du sol de la première campagne, ces emplacements ont également été retenus pour la seconde campagne. Pour la dernière, la chambre n'a été placée qu'en un seul point, en l'absence précédemment de réponse au niveau de l'autre point.

Treize sondages ont été réalisés au droit du bâtiment, arrêtés entre la base de la dalle de fondation et 3 m de profondeur à distance de la zone de battement de la nappe. Les concentrations significatives en benzène et naphthalène ont généralement été observées dans les horizons situés à plus de 1,5 m de profondeur, avec des valeurs respectivement de l'ordre de 150 mg/kg MS et 2200 mg/kg MS (moyennes arithmétiques). Seules ces deux substances sont traitées dans le présent article, choix guidé au regard de leur volatilité et des concentrations observées dans les sols. Ces sondages ont été équipés de puits à gaz (zone crépinée du tube en PEHD, en fonction des points, située entre 0,2 et 0,4 m et 2 et 3 m). Ils ont été le siège de prélèvements d'air du sol durant les 3 campagnes.

Durant ces campagnes, des prélèvements d'air ambiant ont également été réalisés en 7 points à l'intérieur du bâtiment et en 2 points à l'extérieur, respectivement en aval et amont éolien par rapport à la source sol identifiée sous-jacente.

Le Tableau 1 présente une synthèse des concentrations observées dans les gaz du sol et l'air ambiant intérieur pour le benzène et le naphthalène.

<b>Benzène</b>	<b>Oct. 2004</b>	<b>Déc. 2004</b>	<b>Juin 2005</b>
gaz du sol (a), moyenne arithmétique	2282 [105-3949]	784 [10-1500]	1614 [nd-2616]
air ambiant, maximum	0,01 [nd-0,01]	0,18 [nd-0,18] (b)	0,01 [nd-0,01]
<b>Naphtalène</b>	<b>Oct. 2004</b>	<b>Déc. 2004</b>	<b>Juin 2005</b>
gaz du sol (a), moyenne arithmétique	0,4 [0,02-0,9]	0,8 [<LQ-1,8]	1,6 [< LQ-5,7]
(a) : profondeur > à 180 cm pour la zone « crépinée » ; (b) : même point de mesure ; nd : non détecté ; LQ : limite de quantification, de 0,001 mg/m <sup>3</sup> pour le naphthalène ; [minimum – maximum]			

**Tableau 1 – Site n°2 – Concentrations (mg/m<sup>3</sup>) dans les gaz du sol et l'air ambiant**

Pour un même puits à gaz, des variations significatives des concentrations dans les gaz du sol ont été observées en fonction des campagnes de prélèvements. A titre d'exemple, pour le naphthalène, la variation maximale observée atteignait deux ordres de grandeur, la campagne de juin correspondant à la concentration maximale. Entre plusieurs puits à gaz captant à des profondeurs similaires, des variations significatives des concentrations dans les gaz du sol apparaissaient également, à titre d'exemple, de 3 ordres de grandeur pour le benzène lors de la campagne de juin.

De même, dans l'air ambiant intérieur, des variations de concentrations en fonction de la période de mesures ont été observées, atteignant par exemple, pour le benzène et le naphthalène, un ordre de grandeur entre les campagnes de décembre et de juin (et également octobre pour le benzène). Entre les différents points de mesures à l'intérieur du bâtiment, lors d'une même campagne, les concentrations observées étaient globalement similaires, à quelques exceptions près, dont une significative avec une variation de 3 ordres de grandeur pour le benzène lors de la campagne de décembre (valeur maximale). Une explication à ces observations apparaît difficile au vu des données disponibles, tant en terme de caractéristiques du bâtiment ou climatiques, que des concentrations observées dans les sols ou gaz du sol, ou mesures de flux. Cependant, il est à souligner le chauffage du bâtiment durant la période de la campagne de décembre, induisant des contrastes de températures significatifs entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment, l'un des moteur du phénomène appelé « effet de cheminé », favorable au transfert de vapeur depuis le sol vers l'air ambiant intérieur<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>à l'intérieur du bâtiment de 14 à 20°C en octobre, de l'ordre de 20°C en décembre, de 15 à 25°C en juin et à l'extérieur de 14 à 20°C en octobre, de l'ordre de 10°C en décembre, de 15 à 25°C en juin.

A chaque campagne, des mesures de la différence de pression entre le sol et l'air ambiant du bâtiment ont été réalisées en chaque puits à gaz, indiquant que le bâtiment était en dépression, avec des valeurs comprises entre la limite de détection de l'appareil (1 Pa) et 2 Pa. La valeur maximale a été mesurée en décembre également en relation probable avec le fait que durant cette période, le bâtiment était chauffé.

En outre, afin de caractériser le taux de renouvellement d'air dans le bâtiment, l'atmosphère du local a étéensemencée avec le gaz traceur (lors de la première campagne, dans la grande halle et dans le bureau ; lors des campagnes suivantes uniquement dans la grande halle). Des échantillons d'air ont été prélevés dans l'air ambiant en plusieurs endroits du bâtiment et hauteurs (6 points et 2 hauteurs pour la grande halle, 1 point et 1 hauteur pour le bureau) et à des heures connues. Les taux de ventilation observés étaient respectivement de l'ordre de 0,6, 1,8, 0,8 pour les campagnes d'octobre, décembre et juin.

## **5. MODELISATIONS**

Les calculs des concentrations dans l'air ambiant ont été conduits avec deux modèles, semi-analytiques, en régime permanent et pour une source infinie, l'un basé sur les équations de VOLASOIL [8] adaptées par l'INERIS aux spécificités des sites étudiés (modèle multicouche pour dalle de fondation sans vide sanitaire ni cave [10]), et l'autre sur celles de Johnson & Ettinger [4], dénommés par la suite respectivement « VOLASOIL-a » et « J&E ».

Parmi leurs principales caractéristiques peuvent être citées les types de transport et de construction pris en compte :

- pour « VOLASOIL-a » : du transport diffusif dans le sol et dans la jointure et les orifices de fondation, du transport convectif dans le sol et à travers la dalle de fondation de l'habitat ; initialement élaboré pour un bâtiment avec une dalle sus-jacente au vide sanitaire, a été adapté par l'INERIS au cas sans vide sanitaire ;
- pour « J&E » : du transport diffusif dans le sol, dans la dalle de fondation et du transport convectif à travers la dalle de fondation de l'habitat ; un bâtiment avec une dalle de fondation avec ou sans cave sous-jacente.

Pour la paramétrisation de la source, les concentrations en benzène et naphthalène dans le sol et dans l'air du sol, ont été respectivement la moyenne arithmétique des concentrations mesurées dans les sols compris entre 2 et 3 m de profondeur, et celle dans l'air du sol pour chaque campagne, pour les horizons investigués entre 1,8 et 3 m de profondeur. Pour la profondeur des sources, le choix effectué correspond à la profondeur minimale des concentrations maximales observées dans le sol et les gaz du sol, soit 1,8 m.

La majorité des paramètres d'entrée sont issus de mesures sur le site et spécifiques à chaque campagne, hormis les caractéristiques physiques de la dalle de fondation issues de la littérature et spécifiques à la conceptualisation des phénomènes de chacun des modèles utilisés. Le Tableau 2 indique les valeurs des principaux paramètres d'entrée non indiqués ci-dessus.

	Valeur	Source de la valeur
<b>Sol</b>	Sable moyen à fin, avec limon et quelques graviers	
Fraction de carbone organique	0,5	Mesure et estimation
Masse volumique des grains solides (kg/dm <sup>3</sup> )	1,7	Estimation via la bibliographie pour des sols similaires, en cohérence avec des paramètres mesurés, comme la teneur en eau
Porosité totale	0,25	Estimation via la bibliographie pour des sols similaires
Fraction volumique d'eau dans le sol	0,19	Mesure et estimation (à partir de la densité et la teneur en matière sèche)
Fraction volumique d'air dans le sol		Mesure et estimation (à partir de la porosité totale et de la fraction volumique d'eau dans le sol)
Perméabilité à l'air du sol (m <sup>2</sup> )	1 E-13	Estimation via la conductivité hydraulique mesurée et la bibliographie pour des sols similaires
<b>Bâtiment</b>		
Fractions d'ouvertures, spécifique à VOLASOIL	0,00001	Valeur standard du modèle VOLASOIL pour un béton sec qualité moyenne
Perméabilité de fissure (m <sup>3</sup> /m/Pa/s), spécifique à VOLASOIL	1,1.10 <sup>-6</sup>	Valeur standard du modèle VOLASOIL pour un béton sec qualité moyenne
Largeur de fissures dans la dalle de fondation (cm), spécifique à J&E	0,1	Valeur standard du modèle J&E pour un béton de qualité moyenne
Fraction surfacique des ouvertures de plancher v, spécifique à J&E		Estimation du modèle de J&E (v = 0,1 x périmètre de la dalle / surface de l'espace clos)
Taux de renouvellement d'air (h <sup>-1</sup> )	0,6 ; 1,8 ; 0,8	Calculé à partir des mesures de chaque campagne
Différence de pression sol/bâtiment (Pa)	1 ou 2	Mesure sur site et adapté à chaque simulation

**Tableau 2 – Valeurs de principaux paramètres d'entrée des modélisations**

## **6. INTERCOMPARAISON DES MESURES DE TERRAIN ET DES MODELISATIONS**

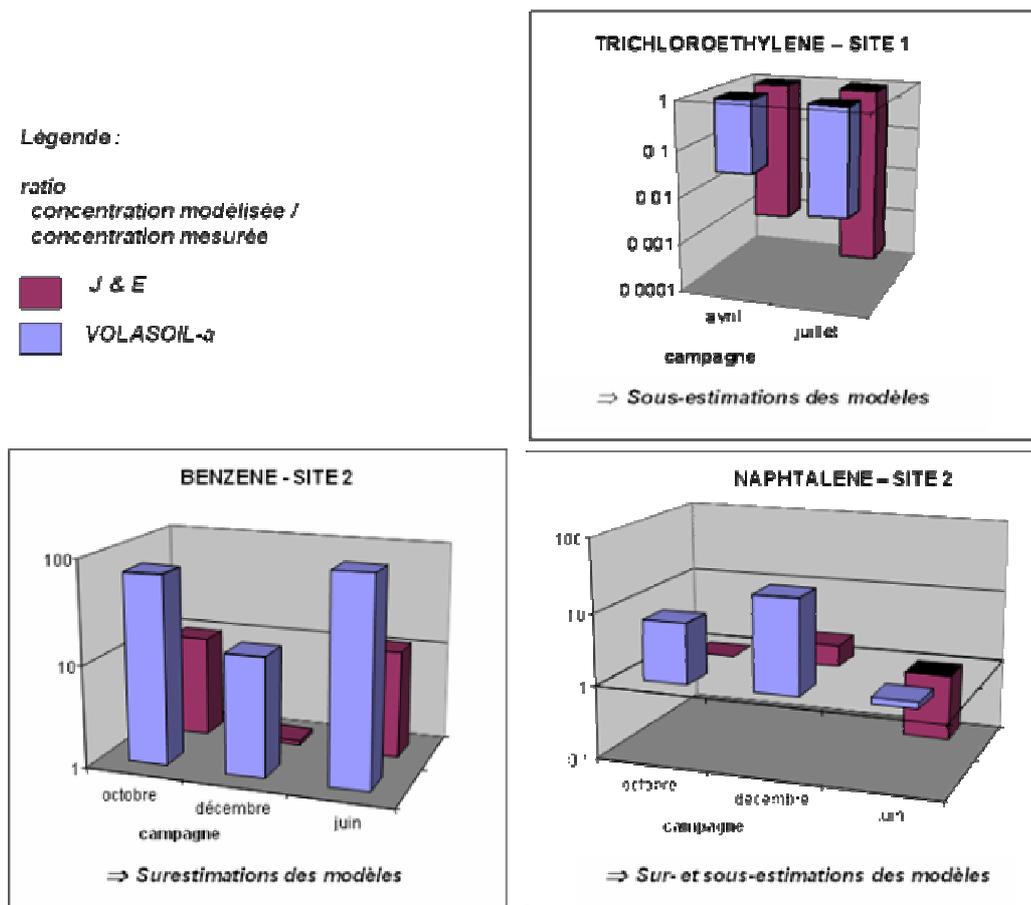
### **6.1 Comparaison des concentrations modélisées aux concentrations mesurées**

Deux modélisations ont été conduites, l'une à partir d'une source « sol », l'autre à partir d'une source « gaz du sol ». Afin de mettre en évidence des divergences potentielles entre les résultats des modélisations et des mesures, les comparaisons ne se sont pas limitées uniquement aux concentrations dans l'air ambiant intérieur. Elles ont également porté sur des données intermédiaires comme les gaz du sol, les flux surfaciques, permettant ainsi l'appréciation de différentes étapes intermédiaires de la modélisation.

La Figure 2 illustre des résultats pour le benzène et le naphtalène, dans le cas d'une source « sol », par le biais des ratios « modélisation/mesure » pour le site n°2. Les résultats dans le cas de modélisations réalisées pour la campagne de décembre pour le benzène et de juin pour le naphtalène, à partir d'une source « air du sol » ne sont pas illustrés dans ce document mais commentés ultérieurement de manière générale. A titre comparatif, sont également rappelés quelques résultats de l'étude du site n°1 pour le t richloroéthylène [16].

Il est à souligner que dès la première étape de la modélisation à partir de concentrations dans le sol, des écarts apparaissent déjà entre les concentrations prédites dans les gaz du sol (modélisation basée sur l'équilibre triphasique) et celles issues de la mesure dans les gaz du sol, pouvant atteindre plusieurs ordres de grandeurs en fonction des paramètres d'entrée des modèles et des campagnes de mesures.

Les résultats conduisent à des conclusions différentes en fonction des substances étudiées, des modèles et de la prise en compte d'une source « sol » ou « air du sol ».



**Figure 2 - : Intercomparaison mesure – modélisation (source « sol ») des concentrations dans l’air ambiant**

**La modélisation « VOLASOIL-a » pour le site 2**, utilisé avec une source « sol », conduit à des concentrations dans l’air intérieur surestimées, pour le benzène, supérieures à un ordre de grandeur, et pour le naphtalène, inférieur ou proche d’un ordre de grandeur. La surestimation la plus faible est observée pour le cas de la campagne de décembre pour le benzène et de juin pour le naphtalène. Dans le cas de la modélisation avec la source « gaz du sol », les concentrations prédites sont du même ordre de grandeur pour le benzène (surestimation d’un facteur 1,2), alors que pour le naphtalène, une situation contraire est observée, avec des concentrations prédites inférieures de plusieurs ordres de grandeur à celles mesurées.

**La modélisation « J & E » pour le site 2**, dans le cas d’une source « sol », montre également une tendance générale à des concentrations prédites surestimées, globalement au maximum d’un ordre de grandeur, à une exception près. Dans le cas du naphtalène, pour la campagne de juin, la concentration prédite dans l’air ambiant est plus faible d’un ordre de grandeur (un facteur 8) à la concentration maximale mesurée. Dans le cas des modélisations avec une source « gaz du sol », les résultats indiquent des concentrations dans l’air ambiant prédites nettement plus faibles que les concentrations mesurées, de plusieurs ordres de grandeur.

## **6.2 Analyse de sensibilité et d’incertitude - Etude paramétrique**

Une étude de sensibilité et des incertitudes associées aux paramètres d’entrée du modèle a été réalisée, en raison de la variabilité des résultats des investigations, dont les origines peuvent être diverses, comme les hétérogénéités des caractéristiques du site (sol, bâtiment, etc.), les incertitudes liées à l’échantillonnage, ainsi qu’à la phase d’analyse (particulièrement lorsque les concentrations sont faibles).

Suite aux spécificités des modèles et des caractéristiques propres au site étudié, les paramètres les plus sensibles et entachés d’incertitudes, sont certains paramètres physico-chimiques du sol et des caractéristiques du bâtiment. L’étude montre qu’en fonction du

paramètre, de la substance étudiée et du modèle, une modification de valeur des paramètres induit des impacts variables sur les concentrations prédites, notamment expliqués par une conceptualisation différente des phénomènes dans chacun des deux modèles. A titre d'exemple est discuté le cas du paramètre « différence de pression entre le sol et l'air ambiant du bâtiment ». Les valeurs de ce paramètre étaient différentes en fonction de la campagne, atteignant 2 Pa pour celle de décembre, sinon égale à 1 Pa (limite de détection et de précision de l'appareil). L'impact de ce paramètre est peu significatif sur les résultats du modèle « VOLASOIL-a », ce qui n'est pas le cas avec « J&E ». Ainsi, en exemple, pour le naphtalène, la concentration modélisée avec « J&E » est diminuée d'un facteur de l'ordre de 10 dans le cas du choix de 0,1 Pa à la place de 1 Pa.

## **7. CONCLUSIONS**

### **7.1 Acquisition des paramètres d'entrée**

Les modèles utilisés recourent à divers paramètres d'entrée. Certains sont facilement accessibles à la mesure, d'autres nécessitent la consultation de bases de données, mais la pertinence du choix des valeurs dans ces bases dépendra *a minima* de certaines mesures sur le terrain. Les mesures doivent donc être conduites à l'aide de protocoles et mesures analytiques précis et reproductibles. La caractérisation des milieux en terme de représentativité est nécessaire tant au niveau spatial que temporel. Ainsi, au regard de l'impact des conditions environnementales du bâtiment et des conditions météorologiques, il apparaît recommandé de réaliser *a minima* deux campagnes de mesures, en période hivernale et estivale ; et pas uniquement durant cette dernière comme couramment réalisé dans le passé. En effet, généralement l'été, les contrastes de températures entre l'air intérieur et extérieur des bâtiments sont plus faibles (absence de l'effet « cheminée ») et les taux de ventilation plus élevés. L'impact de ces phénomènes est également à prendre en compte lors de la caractérisation des gaz du sol.

### **7.2 Prédications des concentrations dans l'air ambiant**

La comparaison des concentrations modélisées et mesurées dans l'air ambiant des bâtiments, indiquent que les concentrations modélisées diffèrent de celles, jusqu'à atteindre plusieurs ordres de grandeur en terme de sous- ou surestimation :

- pour mémoire sur le site n°1 [16] les résultats de s modèles pour le trichloroéthylène et le perchloroéthylène, sous-estimaient les concentrations mesurées, *a minima* d'un ordre de grandeur, atteignant jusqu'à 4 ordres de grandeur dans certains cas de l'étude paramétrique, en fonction du modèle et de la substance. Cela a été observé que ce soit sur la base d'une source « sol » ou « gaz du sol ». La sous-estimation est en général d'un ordre de grandeur supplémentaire pour la modélisation avec « J&E » par rapport à « VOLASOIL-a ». Il est à souligner que ce site avait été le siège de points de mesures moins nombreux, avec notamment des concentrations observées dans les milieux proches des limites de quantification ;
- pour le site n°2, site caractérisé de manière plus approfondie et siège d'une campagne avec des conditions plus favorables au transfert de vapeur, les différences entre les mesures et les modélisations (source « sol ») pour le benzène et le naphtalène, se sont avérées également variables mais moins significatives. Les résultats de ces modélisations surestiment globalement les mesures pour les deux substances, d'un à 2 ordres de grandeur, quel que soit le modèle, « J&E » ou « VOLASOIL-a ». Les différences entre les résultats de ces deux modèles sont généralement inférieures à 1 ordre de grandeur. Quant aux modélisations basées sur une source « air du sol », en fonction du modèle et de la substance concernée, elles sur- ou sous-estiment les concentrations mesurées.

Les paramètres d'entrée les plus sensibles dépendaient du modèle utilisé (cf. conceptualisation différente des phénomènes pris en compte). Malgré les mesures réalisées, certaines incertitudes sur ces paramètres (par exemple, sur la porosité à l'air des sols, la perméabilité à l'air du sol, la différence de pression entre le sol et l'air ambiant intérieur du bâtiment) impactaient les concentrations modélisées jusqu'à un ordre de grandeur.

Plusieurs origines peuvent être avancées pour expliquer les variations entre mesures et modélisations, liées soit aux paramètres d'entrée des modèles, entre autres des résultats des investigations de terrain et de leurs incertitudes associées, soit à la conceptualisation spécifique des phénomènes de transfert de chaque modèle retenu.

Mais aucune tendance ne se dessine selon le modèle retenu, la typologie du site ou les caractéristiques des substances étudiées.

### **7.3 Recommandations et perspectives**

Les étapes de caractérisation des milieux sont primordiales, nécessitant l'acquisition de données de terrain suffisantes (tant au niveau spatial que temporel) et interprétées au regard du problème posé et de la complexité de la situation. La poursuite d'études en terme d'élaboration de protocoles de mesures et d'analyses des gaz du sol et de l'air ambiant apparaît nécessaire.

En terme de modélisation des transferts, il apparaît nécessaire de recoder ses propres outils de travail, en veillant à :

- la cohérence avec le schéma conceptuel du site, vis-à-vis des phénomènes identifiés ;
- la prise en compte de l'analyse des conditions d'élaboration du modèle pour discuter des limites d'utilisation dans l'étude conduite ;
- une convivialité maximale (pas le cas dans tous les outils commercialisés), qui rend ainsi accessible aux modifications chaque paramètre, afin de l'adapter au mieux au cas étudié et de réaliser des études de sensibilité.

Des études de confrontation des mesures/ modèles sur des sites présentant des typologies et des contaminations différentes devront également être poursuivies. L'exploitation de données pré-existantes sur divers sites contaminés et des expérimentations en laboratoires et en équipements pilotes d'échelle réelle, sont également des voies à explorer, par ailleurs déjà intégrées dans des programmes de recherches initiés en 2009 ou débutant en 2010.

### **REMERCIEMENTS**

L'étude a été réalisée dans le cadre d'une convention entre l'ADEME et l'INERIS, et grâce à la mise à disposition des sites par des industriels. Elle a été co-financée par le Ministère en charge de l'Environnement.

### **REFERENCES**

- [1] Jury W.A. Groven R., Spencer W.F., Farmer W.J. (1980) Modeling Vapor Losses of Soil. Incorporated Triallate. Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 44, pp. pp. 445-450.
- [2] 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.
- [3] Nazaroff William W. (1988) Predicting the rate of <sup>222</sup>Rn entry from soil into the basement of a dwelling due to pressure-driven air flow. Radiation Protection Dosimetry, vol. 24 (1/4), pp. 199-202.
- [4] Johnson P.C. and Ettinger R.A. (1991) Heuristic Model for Predicting the Intrusion Rate of Contaminant Vapors into Buildings. Environ. Sci. Technology, 25, pp. 1445-1452.
- [5] Little J.C., Daisey J.M, Nazaroff W.W. (1992) Transport of subsurface contaminants into buildings : an exposure pathway for volatile organics. Environmental Science and Technology, 26 (11), 2058-2066.
- [6] van den Berg R. et al. (1994) Human exposure to soil contamination : a qualitative and quantitative analysis towards proposals for human toxicological intervention values (partly revised edition). National Institute of Public Health and Environmental Protection (Rijkinstituut Voor Volksgezondheid en milieu), Bilthoven, The Netherlands. Report 755201011. April 1991/January 1994.
- [7] Ferguson C.C., Krylov V.V., McGrath P.T. (1995) Contamination of indoor air by toxic soil vapours : a screening risk assessment model. Building and Environmental 30, (3), 375-383.

- [8] Waitz M.F.W., Freijer J.I., Kreule P., Swartjes F.A. (1996) The VOLASOIL risk assessment model based on CSOIL for soils contaminated with volatile compounds. Report n° 715810014. National Institute of Public Health and the Environment, Bilthoven, The Netherlands.
- [9] UK Environment Agency (2002) The contaminated land exposure assessment (CLEA) model : Technical basis and algorithms. R & D Publication CLR 10. [www.environment-agency.gov.uk](http://www.environment-agency.gov.uk)
- [10] Hazebrouck B., Gay G., Hulot C. (2005) Vapor emissions from contaminated soils into buildings : Developments of the volasoil model for multilayer soil. CONSOIL 2005
- [11] Robinson N.I. & Turczynowic L. (2005) One- and Three-Dimensional Soil Transportation Models for Volatiles Migrating from Soils to House Interiors. *Transp Porous Med*, 59 :301-323.
- [12] Provoost J. Cornelis C., Nouwen J. (2003) Subsurface vapour intrusion resulting from soil pollution : a comparative study between software models. In *ConSoil (8<sup>th</sup> international FZK/TNO conference on contaminated soil)*: Gent, Belgium.
- [13] Provoost J., Reijnders L., Swartjes F., Bronders J., Seuntjens P., Lijzen J. (2009) Accuracy of seven vapour intrusion algorithms for VOC in groundwater ? *J. Soils Sediments*, 9 :62-73
- [14] Hers I. (2000) Measurement of BTX vapour intrusion into an experimental building. In *Columbia G. A. L. U. o. B.*, ed.
- [15] Hers I., Zapf-Gilje R., Evans D., Li L. (2002) Comparaison, Validation, and Use of Models for Predicting Indoor Air Quality from Soil and Groundwater Contamination. *Soil and Sediment Contamination*, 11 (4), pp. 491-527.
- [16] Hulot C. Hazebrouck B., Gay G., Malherbe L., Pokryszka Z. (2003) Vapor emissions from contaminated soils into buildings : comparison between predictions from transport models and field measurements. CONSOIL 2003.
- [17] Wijnen H.J., Lijzen J.P.A. (2006) Validation of the VOLASOIL model using air measurements from Dutch contaminated sites. Concentrations of four chlorinated compounds. RIVM report 7117041/2006
- [18] Pokryszka Z., Tauziède C. (1999) Method of measuring surface emissions of methane. *Int. Conf on latest achievements in the field of mine ventilation, fire and methane hazard fighting*, April 1999, Szczyrk, Poland.
- [19] Pokryszka Z., Tauziède C., Cassini Ph. (1995) Developpement and validation of a method for measuring biogas emissions using a dynamic chamber. *5<sup>th</sup> International Landfills Conference - Sardinia'95*, Cagliari, 1995.