

CARACTÉRISATION DES FLUX DE GAZ ÉMIS PAR UN SOL POLLUÉ

Laure Malherbe, Corinne Hulot, Zbigniew Pokryszka, Laurence Rouil
INERIS (Institut national de l'environnement industriel et des risques)

L'inhalation de produits toxiques volatils émis par un sol contaminé peut se révéler une voie d'exposition prédominante pour les populations avoisinantes. La caractérisation d'une telle exposition est une étape indispensable de l'évaluation des risques pour la santé liés à ce sol, qui nécessite au préalable une estimation des concentrations atmosphériques. La modélisation de la dispersion atmosphérique constitue une alternative intéressante à la mesure directe dans l'air ambiant puisqu'elle fournit une représentation spatiale des concentrations et qu'elle est adaptée à une évaluation sur le long terme. Toutefois, la fiabilité et la précision des résultats dépendent grandement de la qualité des données d'entrée. Notre étude vise donc à développer une méthode efficace de caractérisation de la zone source. Cette méthode comprend des mesures ponctuelles in situ du flux de gaz émis par le sol à l'aide d'un dispositif élaboré par l'INERIS, et une interpolation entre ces mesures par les techniques de la géostatistique.

Inhalation of volatile chemicals emitted from a contaminated soil might form a major exposure way for people living on site and in the surroundings. It is essential then to quantify ambient air concentrations for characterizing such exposure and assessing the risks for human health.

Two approaches are commonly used :

Direct ambient air monitoring only supplies punctual information which is strongly dependent on the prevailing meteorological conditions. Furthermore, concentrations lying below the analytical detection limits cannot be measured whereas they may be harmful to health, especially in the case of a long term exposure.

Some exposure models include transfer functions which derive concentrations in the atmosphere from those measured in soil or in the soil pore-air. Such functions are based on simplified hypothesis and can ignore site characteristics likely to influence atmospheric dispersion.

To overcome the limitations of both methods INERIS has examined the possibility of using atmospheric dispersion models. According to a preliminary modelling study, they might be useful tools to produce quantitative maps of short term worst case or long term concentrations, making it possible to delimit the impact area of the emissions from the soil. However, the reliability of the model predictions largely depend on the precision of the input data. In particular the pollution source should be defined very carefully. This is why INERIS has devised a strategy for getting a quantitative spatial representation of soil-to-air fluxes : it combines emission measurements with an original monitoring device and interpolation between the measured values using geostatistical techniques. This strategy was tested on an experimental site near Strasbourg (France).

INTRODUCTION

L'inhalation de produits toxiques volatils émis par un sol contaminé peut constituer une voie d'exposition prédominante pour les populations qui vivent sur le site ou dans ses alentours. La caractérisation d'une telle exposition est une étape indispensable de l'évaluation des risques pour la santé liés à ce sol. Elle nécessite au préalable une estimation des concentrations atmosphériques.

Deux méthodes sont couramment employées à cette fin : la métrologie et l'utilisation de modèles simplifiés.

– Les mesures directes dans l'air ambiant fournissent une information circonscrite à quelques points de l'espace et limitée dans le temps. Les données recueillies sont dépendantes des conditions météorologiques qui prévalent pendant la campagne de mesure. En outre les concentrations inférieures au seuil de détection analytique ne peuvent être quantifiées, alors que le risque pour la santé engendré par ces concentrations n'est pas nécessairement négligeable.

– Certains modèles d'exposition incluent des fonctions

de transfert qui déduisent les concentrations atmosphériques des concentrations mesurées dans le sol ou dans l'air du sol. De telles fonctions, fondées sur des hypothèses simplifiées, peuvent négliger des caractéristiques du site susceptibles d'influencer la dispersion.

Afin de pallier les défauts de ces deux méthodes, l'Ineris s'est engagé dans une troisième voie : la mise en œuvre de modèles de dispersion atmosphérique. D'après les conclusions d'une étude préliminaire [1][2], ces modèles constitueraient un moyen efficace de quantifier et de cartographier les concentrations atmosphériques attribuables aux émissions du sol sur le long terme comme sur le court terme. Toutefois, la fiabilité et la précision des résultats dépendent grandement de la qualité des données d'entrée, en particulier des données d'émission. Notre étude vise donc à développer une stratégie de caractérisation de la zone source. Cette stratégie comprend des mesures ponctuelles in situ du flux de gaz vers l'atmosphère et une interpolation entre ces mesures par les techniques de la géostatistique. Elle a été appliquée à deux reprises sur le site expérimental de l'Ifare à Strasbourg.

TECHNIQUE DE MESURE

Principe de la mesure : la chambre à recirculation externe

Le système de mesure a été initialement conçu par l'Ineris afin d'évaluer les flux de méthane émanant de décharges ou de sites miniers. Son efficacité a été démontrée lors de nombreuses campagnes de mesure, conduites le plus souvent sur des décharges. Des travaux complémentaires, financés par le Ministère de l'Environnement avec le concours de Rhodia Rhoditech, ont permis d'adapter ce système à la mesure d'un plus grand nombre de composés caractéristiques d'une pol-

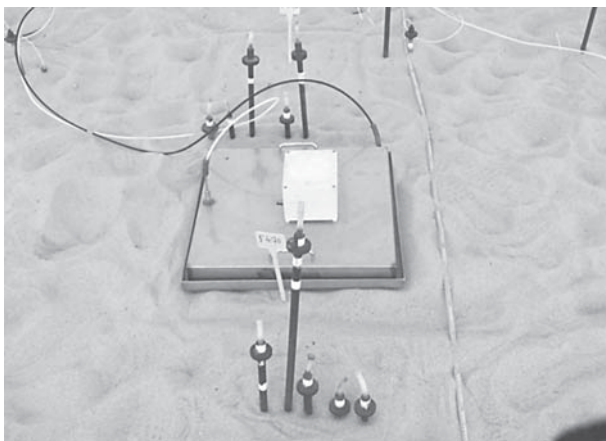


Figure 1 - Chambre à recirculation externe

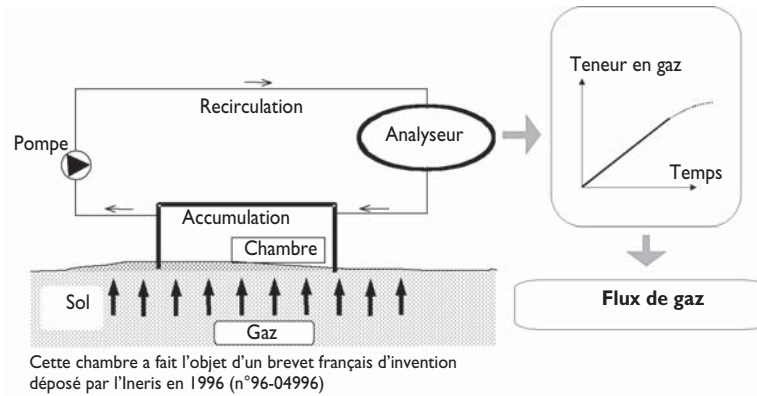


Figure 2 - Dispositif de mesure des flux

lution industrielle (BTEX et solvants chlorés).

Il se compose d'une chambre à base carrée, large de 50 cm, que l'on enfonce dans les premiers centimètres du sol, et d'un analyseur relié à cette dernière (figure 1). Il fonctionne selon le principe d'accumulation et de recirculation externe. Le mélange gazeux qui se dégage de la surface du sol couverte par le dispositif est dirigé vers l'analyseur, puis réinjecté dans la chambre, créant une recirculation de gaz. L'atmosphère emprisonnée dans le volume de la chambre s'enrichit ainsi en polluant. Le suivi de cet enrichissement en fonction du temps permet de déduire la valeur du flux local (figure 2).

L'analyseur

Deux types de capteurs sont utilisés :

- un capteur FID¹ pour la mesure du flux total d'hydrocarbures ;
- différents capteurs PID² dont la combinaison des réponses permet non seulement d'estimer le flux total mais aussi de déterminer, dans une certaine limite, la composition de ce flux. Toutefois, dans le cas d'un mélange complexe de plusieurs produits, la contribution de chaque composé se laisse plus difficilement quantifier. C'est un flux global par famille de polluants que fournit plutôt l'analyse (BTEX / famille des chlorés).

L'efficacité de ces techniques a été éprouvée en laboratoire et dans des conditions réelles de site contaminé [2][3]. Ces expériences in situ ont confirmé la capacité de l'analyseur FID de détecter des flux gazeux très faibles (de l'ordre du $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$). Cette possibilité se révèle d'autant plus utile que d'ordinaire, les émissions gazeuses d'un sol pollué sont particulièrement faibles, sans pour autant devoir être négligées. La sélectivité de l'analyseur PID reste à améliorer. Des essais sur le terrain ont permis de constater, par comparaison avec des concentrations mesurées dans l'air du sol, que si la part des BTEX était bien évaluée, celle des composés chlorés l'était sensiblement moins.

En plus de ses performances techniques, la chambre de mesure des flux présente certains avantages pratiques : c'est un outil maniable, et la durée d'une mesure n'est

que de quelques minutes. Ainsi, au rythme de trente à soixante mesures par jour suivant la nature du sol, une ou deux journées peuvent suffire à quadriller le site selon un maillage dense.

Cartographie du flux

L'emploi de techniques d'estimation géostatistiques comme le krigeage a pour fin d'interpoler le flux sur la zone étudiée entre les valeurs observées en des points particuliers, tout en respectant la structure de corrélation spatiale du phénomène (ici les émissions vers l'atmosphère de polluants volatils). Cette structure est synthétisée par le variogramme, qui représente la variance de l'accroissement du flux en fonction de la distance :

$$\gamma(h) = 1/2 \text{Var}(Z(x+h) - Z(x))$$

Z étant le flux

En pratique, un modèle variographique est ajusté au variogramme expérimental qui a été calculé à partir des données mesurées. C'est ce modèle qui est utilisé dans l'estimation du flux.

La mise en œuvre de méthodes géostatistiques est favorisée par l'échantillonnage régulier et dense réalisable grâce à la chambre à accumulation (cf. § précédent). Appliqué aux données d'émission, le krigeage permet ainsi de cartographier les flux de gaz dans la zone d'étude. Un terme source peut être alors défini à partir de cette représentation quantitative et introduit dans un modèle de dispersion atmosphérique.

La carte de flux donnée en illustration (figure 3) a été établie à la suite d'une campagne de mesure conduite sur le site expérimental de l'Ifare à Strasbourg. Un mélange de tri- et de tétrachloroéthylène avait été injecté dans la zone non saturée de cet aquifère artificiel (bassin rempli d'un milieu sableux) quelques semaines avant les essais. Les mesures par FID ont été effectuées selon un schéma d'échantillonnage régulier en une centaine de points, dans un domaine d'environ 12 m x 12 m, ce qui correspond à une maille d'échantillonnage de l'ordre d'un mètre. Cet échantillonnage, par son étendue et sa densité, couvrait la quasi totalité de la surface potentiellement émettrice.

L'écart-type de l'erreur d'estimation ou écart-type de krigeage est un indicateur de la précision de l'estimation. Dans l'exemple de la figure 4, il prend des valeurs relativement faibles, ce qui ne peut surprendre compte tenu de l'échantillonnage dense et de la régularité du phénomène mise en évidence par le variogramme. Celle-ci pourrait s'expliquer par le fait que les données ne sont

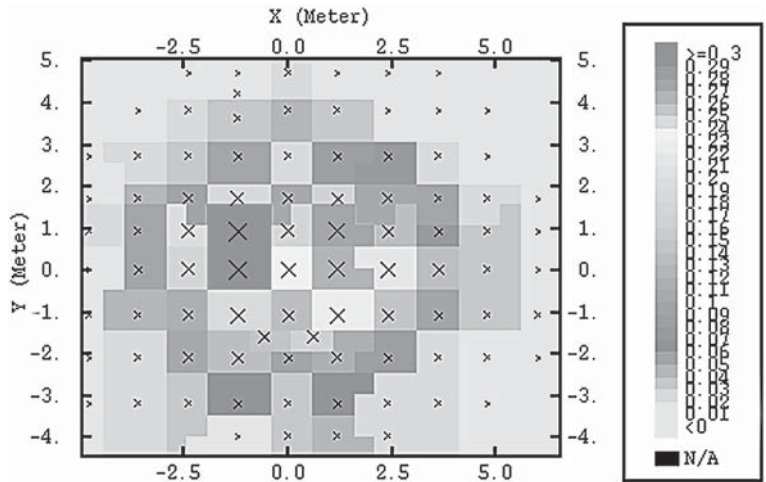


Figure 3 - Cartographie du flux total de TCE et PCE sur le site expérimental de l'Ifare (mars 2002) obtenue par krigeage ordinaire. Valeurs de flux (cm³/min.m²)

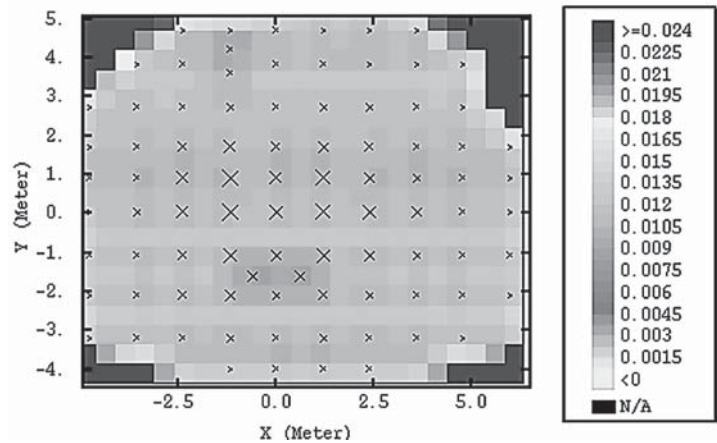


Figure 4 - Carte de l'écart-type de krigeage (cm³/min.m²)

pas véritablement ponctuelles mais correspondent à une moyenne du flux sur une petite surface. L'écart-type de krigeage augmente uniquement dans les parties extrapolées, traduisant une perte de précision en bordure du domaine.

CONCLUSION ET DISCUSSION

La méthodologie proposée dans cette étude s'inscrit dans le contexte de l'évaluation des risques liés aux sites pollués. Elle a pour but d'estimer les flux de composés volatils, tels que les BTEX et les solvants chlorés, du sol vers l'atmosphère. Des essais en laboratoire et sur site ont montré la faisabilité de cette approche et mis en évidence plusieurs avantages en termes d'efficacité de coût.

- Le système de mesure et d'analyse est fiable et sensible. Il rend possible la détection de faibles taux d'émission (flux volumiques totaux de l'ordre de 10⁻³ cm³/mn.m²).
- La chambre à accumulation est maniable et la durée

d'une mesure n'excède pas quelques minutes. Le transport de matériel et le temps nécessaire à l'échantillonnage du site ne sont donc pas des contraintes particulières. Selon la taille et la nature du site, une à trois journées suffisent à caractériser les émissions d'un sol pollué.

– Les résultats bruts des mesures peuvent être visualisés en direct grâce à un enregistreur raccordé à l'analyseur. Selon la réponse de ce dernier, l'évaluateur peut ajuster la position des points d'échantillonnage ou modifier la densité du maillage.

– La méthodologie élaborée par l'Ineris permet à l'évaluateur de caractériser correctement la zone d'émission. Pourvu que les autres paramètres d'entrée soient convenablement définis, cette information peut être introduite dans un modèle de dispersion pour évaluer les concentrations atmosphériques de polluant sur le site et dans ses alentours.

– Par ailleurs, les résultats des mesures de flux peuvent aider à l'élaboration d'une stratégie d'échantillonnage du sol.

Certains points méritent d'être approfondis :

La sélectivité de l'analyse par PID demande à être affinée. Cette exigence de sélectivité est d'autant plus importante que les gaz émis par un sol pollué contiennent généralement de nombreux composés.

Les cartographies de flux obtenues jusqu'à présent reflètent uniquement la situation au moment des mesures. Or, dans la perspective d'une évaluation des risques sur le long terme, il conviendrait de considérer les variations saisonnières des émissions et l'influence de la météorologie sur l'importance de ces émissions.

Enfin des essais dans des bâtiments d'un ancien site industriel semblent attester l'efficacité de la chambre pour mesurer les émissions d'un sol pollué vers l'atmosphère intérieure de bâtiments^[4]. Ce champ d'application est actuellement à l'étude.

Malherbe Laure

Ingénieur d'études et recherches - INERIS, Direction des risques chroniques, unité modélisation et analyse économique pour la gestion des risques
tél : + 33 (0)3 44 55 62 18, E-mail : laure.malherbe@ineris.fr

Hulot Corinne

Ingénieur d'études et recherches - INERIS, Direction des risques chroniques, unité déchets et sites pollués
tél : + 33 (0)3 44 55 62 43, E-mail : corinne.hulot@ineris.fr

Pokryszka Zbigniew

Responsable de l'unité évaluation des risques liés aux émissions de gaz - INERIS, Direction des risques sol et sous-sol
tél : + 33 (0)3 44 55 64 41, E-mail : zbigniew.pokryszka@ineris.fr

Rouil Laurence

Ingénieur d'études et recherches - INERIS, Direction des risques chroniques, unité modélisation et analyse économique pour la gestion des risques
tél : + 33 (0)3 44 55 61 13, E-mail : laurence.rouil@ineris.fr

Remerciements

Ce travail fait partie d'un projet de recherche financé par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable et par l'Ademe

Les auteurs remercient l'Ifare d'avoir mis son site expérimental à la disposition de l'Ineris pour les essais présentés dans cet article.

Notes :

1. Détection par ionisation de flamme
2. Détection par photo-ionisation

Références

1. Baud-Grasset F., Bonnet P., Girardeau Y., Jamois D., Pokryszka Z., Rouil L., 2000 *Estimating atmospheric transfers from contaminated sites*, Consoil 2000, Leipzig, octobre 2000, 727-733.
2. Rouil L., Malherbe L., 2002 *Transferts atmosphériques à partir d'un sol pollué*. Rapport Ineris, juil. 2002.
3. Pokryszka Z., 2001. *Mesures du flux*

gazeux de composés organochlorés sur le site expérimental de l'Ifare à Strasbourg. Rapport Ineris, nov. 2001.

4. 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, Gant, 14-15 mai 2003.