

Edito

Comprendre et maîtriser les impacts des polluants gazeux des sols sur la qualité de l'air intérieur

La présence de composés volatils dans les sols peut engendrer des risques sanitaires par inhalation de vapeurs dans les environnements intérieurs. En effet, les vapeurs issues de polluants gazeux peuvent pénétrer dans les bâtiments et dégrader la qualité de l'air intérieur.

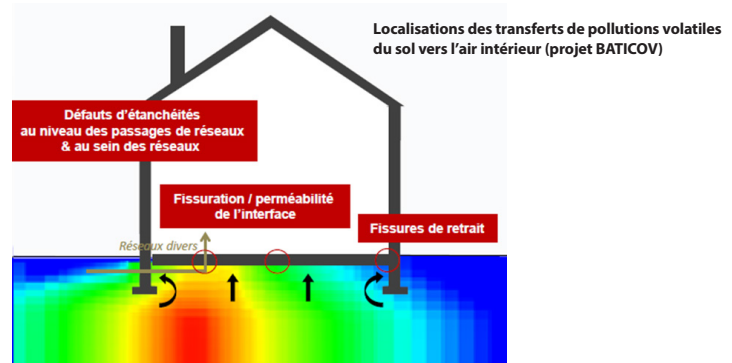
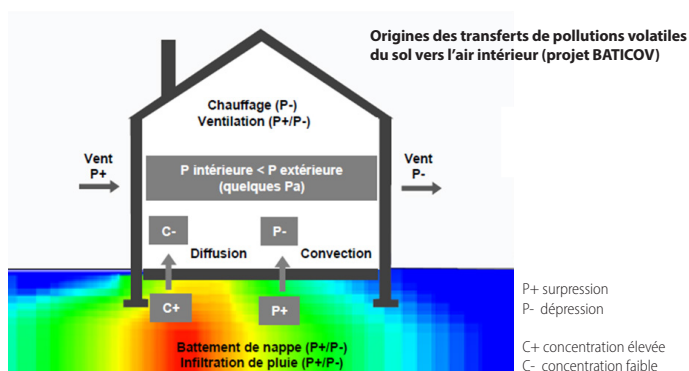
Les conditions d'exposition intérieure sont sujettes à de fortes variabilités, car elles dépendent à la fois des caractéristiques du sol, du polluant, du bâtiment (fondations, structures et aménagements et systèmes de renouvellement de l'air) et des conditions hydrométéorologiques.

Les **mécanismes de transferts** des composés volatils à l'intérieur des bâtiments qui en résultent s'avèrent complexes. Aussi, dans un contexte où une pression croissante s'exerce pour la reconversion de friches industrielles et où l'appréciation des risques doit permettre une gestion optimale des situations, différents projets financés pour la plupart par l'Ademe⁽¹⁾ et menés au cours de la dernière décennie, sont présentés dans ce numéro spécial consacré aux projets relatifs à la qualité de l'air intérieur en lien avec la gestion de sites pollués.

Ces projets ont pour particularité d'avoir apporté des connaissances nouvelles permettant de compléter les outils de gestion disponibles pour **comprendre et maîtriser les impacts des polluants gazeux** des sols sur la qualité de l'air intérieur. Ces projets se sont notamment attachés à améliorer les pratiques tant en termes de métrologie, de stratégie d'échantillonnage selon l'objectif du diagnostic que de modélisation. Ils ont également contribué à mettre en perspective ou bien à tester des mesures constructives pour protéger les bâtiments des pollutions gazeuses venant du sol.

Les projets traités dans ce bulletin ont ainsi permis :

- d'aboutir à un **guide méthodologique** pour l'évaluation des transferts de COV (projet Fluxobat) ;
- d'apporter des éléments pour le **dimensionnement des campagnes de mesure** et d'interprétation des données vis-à-vis



de la variabilité temporelle des concentrations dans les gaz du sol et l'air intérieur et de l'influence de l'humidité des gaz du sol sur le prélèvement de polluants dans ce milieu (projet TEMPAIR) ; L'étude des facteurs météorologiques (épisodes de pluie successifs, variations de pression atmosphérique et variations de niveau de nappe) sur les transferts de composés organiques volatils du sol vers l'air intérieur s'est également appuyée sur les modèles numériques (projet EFEMAIR) ;

- d'améliorer des **modèles analytiques de transfert** des polluants gazeux du sol vers les bâtiments (projet AGIR QAI) en couplant les interactions entre le milieu « sol » et le milieu « bâtiment » ; pour mieux intégrer les hétérogénéités du sol et des polluants, le couplage de mesures in situ de flux de vapeurs en surface permet de déterminer une source homogène équivalente dans les sols à partir de laquelle la modélisation des transferts vers l'air intérieur d'un futur bâtiment vient s'appuyer (projet CAPQAI) ;
- d'évaluer les **performances des Systèmes de Dépressurisation du Sol** à fonctionnement naturel (SDS) qui sont des dispositions constructives visant à réduire le transfert des polluants gazeux du sol vers les environnements intérieurs (projet EVALSDS) ;
- d'identifier les **freins et les leviers** à un déploiement de dispositions constructives efficaces et pérennes pour maîtriser les pollutions résiduelles en complément d'actions sur les sources ou en tant que mesures préventives ; pour les quatre grandes familles de dispositions constructives, ont été élaborés des outils méthodologiques et d'aide à la décision incluant les points d'attention spécifiques à chacun des 6 principaux acteurs impliqués dans ces projets depuis la programmation jusqu'à l'exploitation des bâtiments (projet BATICOV).

Souad Bouallala-Selmi

Service Évaluation de la Qualité de l'Air, ADEME et membre du comité de pilotage RSEIN

Yves Duclos, Franck Marot

Service Friches urbaines et Sites pollués, ADEME

Nathalie Velly,

Direction des Risques Chroniques, Ineris

⁽¹⁾ soit dans le cadre de l'appel à projets GESIPOL soit dans le cadre de l'appel à projets CORTEA



Évaluation des transferts de composés organiques volatils « COV » du sol vers l'air intérieur et extérieur

Projet co-financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et labellisé par les pôles de compétitivité ADVANCITY, AXELERA, RISQUES

Auteurs du guide : TRAVERSE S. (BURGEAP), SCHÄFER G. (LHYGES), CHASTANET J. et CÔME J.-M. (BURGEAP), HULOT C., GAY G. et PERRONNET K. (Ineris), COLLIGNAN B. (CSTB), COTEL S. (LHYGES), MARCOUX M. (IMFT), CORREA J. (Grand Lyon, Direction du foncier et de l'immobilier), QUINTARD M. (IMFT), PEPIN L. (TERA Environnement).

La question des transferts de polluants organiques volatils des sols vers l'air se pose à toute maîtrise d'ouvrage de projets d'aménagement urbain, en particulier lors de la rénovation ou de la construction de bâtiments. Les gestionnaires de parcs immobiliers (collectivités, syndics, etc.) peuvent également s'y trouver confrontés lors de diagnostics de la qualité de l'air intérieur. Parallèlement, les administrations (ARS⁽³⁾, DREAL⁽⁴⁾), dans leur rôle de garant de la gestion des pollutions industrielles et de la santé des populations, sont concernées à travers l'analyse des situations et les demandes d'actions qu'elles prescrivent. Enfin, les recommandations formulées dans le cadre du projet visent les prestataires qui réalisent ce type d'études (bureaux d'étude, etc.).

Le projet FLUXOBAT a permis d'aboutir à un guide méthodologique relatif à l'évaluation des transferts de composés organiques volatils du sol vers l'air intérieur et extérieur, à destination des professionnels du domaine. Ce guide s'articule autour des outils disponibles et de leur utilisation pour répondre aux différentes questions posées lors des processus de gestion des sites pollués :

- Que faire pour s'assurer de l'absence de pollution potentielle par des substances volatiles sur un site ?
- Que faire pour s'assurer que l'état du site pollué par des pollutions volatiles reste compatible avec son usage actuel ?
- Que faire pour réaménager un site pollué avec conservation des bâtiments existants ou construction de bâtiments nouveaux ?
- Que faire pour s'assurer que l'évolution des pollutions résiduelles du site ne rende pas son état incompatible avec son usage ?

En référence aux prestations de la norme NF X 31-620 « Qualité des sols – Prestations de services relatives aux sites et sols pollués (études, ingénierie, réhabilitation de sites pollués et travaux de dépollution », le guide FLUXOBAT fournit les éléments permettant de répondre à ces questions.

Le chapitre 1 est dédié à la méthodologie générale, et au cadre réglementaire et normatif. Il contient notamment des schémas synthétisant les recommandations formulées dans le guide qui permettent au lecteur d'identifier les outils de diagnostic et de modélisation à mettre en œuvre. Ils reposent sur une approche progressive et proportionnée. Les outils de diagnostic et de modélisation sont présentés au regard des objectifs attendus en lien avec les questions de la maîtrise d'ouvrage, des constats actuels de mise en œuvre et des verrous tant techniques que méthodologiques.

Le chapitre 2 présente les mécanismes de transport des composés organiques volatils dans les quatre compartiments étudiés (sols, soubassements et dalle, air intérieur, air extérieur). Sont précisées, entre autres, l'influence des variations de pression sur les écoulements d'air ainsi que l'influence de la température sur la volatilité des polluants. Le chapitre 2 se conclut par le recensement des paramètres nécessaires à la compréhension des transferts et des recommandations quant à leur mesure sur site ou au laboratoire.

Les diagnostics sont déclinés en 4 chapitres : mesures des paramètres physiques (chapitre 3), mesures de concentration dans les gaz des sols (chapitre 4) et l'air intérieur (chapitre 6) et mesures de flux à l'interface entre le sol ou la dalle du bâtiment et l'air (chapitre 5).

Après un état des lieux des normes et guides existants, des recommandations portant sur le dimensionnement des diagnostics, leur mise en œuvre et l'interprétation des données sont formulées et illustrées par des travaux réalisés dans le cadre du projet FLUXOBAT. En particulier, les mesures et modélisations conduites ont mis en évidence de fortes variations temporelles et spatiales des concentrations dans les gaz du sol et dans l'air intérieur qu'il convient de prendre en compte dans le dimensionnement des diagnostics. Dans tous les cas, la localisation des points de mesures, la méthode et la durée de prélèvement doivent être choisies au regard de l'objectif recherché.

Concernant la modélisation, une typologie de modèles de transport est proposée en lien avec le degré d'approfondissement et la complexité des situations à traiter. Répondant à différents objectifs d'étude, le choix d'une typologie de modèles est recommandé, avec une description de ces modèles et de leurs avantages / inconvénients (chapitre 7). Sont ainsi mis en avant l'utilisation (i) de facteurs empiriques d'atténuation pour la discrimination de situations nécessitant ou non un approfondissement, puis (ii) l'utilisation de modèles analytiques 1D simplifiés (Johnson et Ettinger, 1991, Waitz et al. 1996, Bakker et al. 2008), et enfin (iii), dans des situations complexes, le couplage de modèles dont des modèles numériques dans le(s) compartiment(s) où les hétérogénéités ne permettent pas les simplifications imposées par les modèles analytiques. Ainsi, comme pour les diagnostics, une approche progressive et proportionnée de la modélisation est recommandée.

Les données nécessaires à la mise en œuvre des modèles (concentrations et flux, éléments de géométrie, paramètres) sont présentées au chapitre 8 qui précise par ailleurs leurs origines recommandées et possibles. Pour les éléments de géométrie, un questionnaire est proposé tandis que pour les paramètres, des données de la littérature sont recensées.

Enfin, les différentes étapes de modélisation (chapitre 9) mettent en exergue l'importance de la compréhension des transferts et de la connaissance de la géométrie des aménagements dans le choix d'un modèle. Vis-à-vis des modèles analytiques 1D largement mis en œuvre à l'heure actuelle, les travaux de confrontation avec les mesures et la modélisation numérique 3D sur le bassin expérimental SCERES et sur le site atelier FLUXOBAT montrent la faisabilité d'une représentation de la dalle du bâtiment par un milieu poreux équivalent (modèles de Waitz et al. 1996 et Bakker et al. 2008).

Par ailleurs, ils illustrent l'influence significative du choix du type de fondation et des caractéristiques géométriques et physiques du système sur les concentrations modélisées. Les travaux conduits ont ainsi permis d'illustrer les limites des modèles analytiques.

Mentionnons que les variations spatiales et temporelles des flux et concentrations dans les gaz du sol et dans l'air intérieur mesurées sur le site atelier FLUXOBAT ainsi que les hypothèses de modélisation retenues sont dépendantes des caractéristiques de la pollution, des sols et du bâtiment. Ils ne peuvent de ce fait être transposés tels quels à une autre situation.

Les documents relatifs au projet FLUXOBAT sont disponibles sur www.fluxobat.fr

⁽²⁾ **Traverse S., Schäfer G., Chastanet J., Hulot C., Perronnet K., Collignan B., Cotel S., Marcoux M., Côme J.M., Correa J., Gay G., 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**

⁽³⁾ **Agence régionale de Santé**

⁽⁴⁾ **Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement**



Projet TEMPAIR - 2017

Variabilité temporelle des concentrations dans les gaz de sol et dans l'air intérieur. Étude des facteurs d'influence et recommandations en termes de prélèvements.

Projet R&D co-financé par l'ADEME dans le cadre de l'appel à projets GESIPOL.

Auteurs : TRAVERSE S., CHASTANET J., PITAVAL D., DORFFER L. et GLEIZE T. (BURGEAP), HULOT C., RICHEZ F. (Ineris)

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⁽⁵⁾ et les prestations encadrées par la norme NF X 31-620. Parallèlement, pour les projets de changement d'usage concernant des terrains ayant accueilli une installation classée mise à l'arrêt définitif ou se situant dans un secteur d'information sur les sols (SIS), 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 présentes ou futures en polluants volatils dans les gaz du sol 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.

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 au droit de l'étendue d'un panache de pollution, l'estimation des concentrations d'exposition repose sur des diagnostics dans l'air intérieur.

Des recommandations sont formulées dans la norme ISO 18400-204:2017 « Qualité du sol – Échantillonnage — Partie 204: Lignes directrices pour l'échantillonnage des gaz de sol » 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 d'interprétation notamment en termes de 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.

Le projet TEMPAIR 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.

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 (BURGEAP),
- Partie 2 : l'utilisation des échantillonneurs passifs pour les gaz du sol (Ineris),
- 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 (BURGEAP),

et chacune de ces questions a fait l'objet d'un livrable distinct.

Partie 1⁽⁶⁾ : Variabilité temporelle des concentrations en PCE dans les gaz du sol et l'air intérieur

Les facteurs d'influence étudiés sont les conditions hydro-météorologiques (niveau de nappe, pression atmosphérique, vent, température, etc.) 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 jour/nuit. Les 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 (effets antagonistes ou synergiques).

Dans l'air intérieur, les campagnes de mesures mettent en évidence des variations pouvant atteindre un ordre de grandeur. Les variations sont également observées à 3 échelles : variations saisonnières, pluri-journalières et diurnes. Sur le site étudié, il a 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).

Des recommandations sont formulées quant à l'acquisition de ces variables et leur interprétation. Il a été estimé cependant que l'interprétation de leur influence ne pouvait 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.

Partie 2⁽⁷⁾ : Évaluation des échantillonneurs passifs pour le PCE dans les gaz du sol

La littérature et les guides traitant de la mesure des masses et des concentrations dans les gaz du sol et l'air intérieur (FLUXO-BAT (Traverse et al. 2013), ATTENA (ADEME, 2013), CityChlor (ADEME, 2013), BRGM/Ineris (2016), etc.) mettent en exergue la forte variabilité temporelle des concentrations dans ces milieux.

De ce fait, la mise en œuvre de prélèvements au moyen d'échantillonneurs passifs (EP) permet l'acquisition de concentrations moyennes sur de longues durées (d'une à plusieurs semaines), intégrant les variations non observées lors de mesures ponctuelles de courtes durées (prélèvements dynamiques ou par aspiration naturelle).

L'utilisation d'EP apparaît plus appropriée aux objectifs techniques et scientifiques de certaines études telles que l'évaluation de l'exposition des populations, le dimensionnement de travaux de dépollution, la surveillance de l'évolution de l'état des milieux.

Le projet repose sur l'évaluation des performances de 5 échantillonneurs passifs pour la caractérisation des gaz du sol. Ces EP ont été mis en œuvre au cours de plusieurs campagnes de mesure au sein de 7 ouvrages permanents (piézairs) captant différents horizons lithologiques et de 5 trous de sondage de sub-surface non équipés (obturés par un bouchon étanche) couvrant 3 différentes zones du site atelier, présentant des gammes de concentrations en PCE différentes, de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à plusieurs centaines de mg/m^3 .

Dans le cadre d'études de screening des gaz du sol (résultats qualitatifs exprimés en masse adsorbée sur le support adsorbant de l'EP), menées pour une reconnaissance qualitative de la contamination d'un site, dans le but notamment d'identifier la ou les zones « source » ou de délimiter le panache gazeux de pollution, les travaux menés ont montré des résultats (en masse) cohérents entre les différents EP utilisés en termes de zonations (zonations identiques des masses maximales et minimales mesurées).

Les résultats des EP pour la caractérisation des gaz du sol mettent en évidence pour certains d'entre eux et pour certaines gammes de concentrations de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au g/m^3 et durées d'exposition (1 à 7 jours) des résultats en concentration comparables à ceux des prélèvements dynamiques avec charbon actif (référence).

La concentration donnée est dépendante du taux d'échantillonnage (qui représente la quantité de matière adsorbée en fonction du temps). Les conditions d'établissement et les incertitudes inhérentes à l'utilisation de ces taux d'échantillonnage pour une autre durée d'échantillonnage ou un autre niveau de concentration ne sont pas toujours fournies par les fabricants. Ainsi, les incertitudes associées à une utilisation de ces EP en dehors des conditions d'élaboration de ce taux d'échantillonnage par le fabricant, conduisent à recommander une utilisation de ces EP pour des études qualitatives ou semi-quantitatives.

Ainsi, pour le choix des EP, il doit être tenu compte :

- des objectifs de l'étude (screening, diagnostic, surveillance, évaluation des expositions, etc.) vis-à-vis de l'intégration temporelle souhaitée et du type de résultats nécessaires, en masse ou en concentration (les résultats en concentration n'étant pas fournis pour tous les EP),
- des caractéristiques de l'EP tenant compte des spécificités du site (substances, concentrations attendues, durées d'exposition souhaitées, etc.) et de leur géométrie (taux d'échantillonnage, capacité d'adsorption, gammes de validité, etc.), pour lesquelles des échanges avec les fournisseurs sont primordiaux.

Il apparaît nécessaire de poursuivre des travaux, plus particulièrement sur la quantification des concentrations dans les gaz du sol avec des EP mis en œuvre dans des trous de sondage de sub-surface non équipés (obturés par un bouchon étanche) ou dans les piézairs. Ces derniers concernent notamment l'étape de conversion en concentration des résultats en masse, la validité de l'intégration à cette conversion, pour certains EP, de paramètres du sol (porosité, etc.) ainsi que des caractéristiques de l'ouvrage (influence du volume d'air entourant l'EP). Cela permettrait de proposer des recommandations pour l'utilisation des EP dans différents contextes d'études et les cas pour lesquels les EP peuvent être complémentaires aux techniques de prélèvements dynamiques ou par aspiration naturelle (Canister®).

Partie 3⁽⁸⁾ : 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

Filtres anti-humidité pour les prélèvements

Trois campagnes ont été conduites en 2015 avec des filtres anti-humidité sur le site atelier sur trois piézairs captant chacun un horizon lithologique (remblais, limons et sables). Au cours de chaque campagne, les mesures de température et d'humidité des gaz du sol dans ces ouvrages ont été conduites. Les travaux menés ont conclu à l'absence d'affinité entre les agents dessiccateurs de ces filtres et le PCE et TCE présents dans les gaz du sol.

Dans les conditions des expérimentations les concentrations mesurées avec des charbons actifs en utilisant ou non des filtres anti-humidité ne sont pas significativement différentes. L'écart maximum obtenu est de 19% pour le PCE et 29% pour le TCE, ce qui est inférieur ou de l'ordre de grandeur de l'incertitude analytique.

Il ressort des travaux réalisés l'absence d'intérêt significatif quant à l'utilisation de filtres anti-humidité pour les prélèvements de gaz du sol en conditions humides visant la quantification des concentrations en PCE et TCE comprises respectivement entre 5 et 250 mg/m³ et entre 0,01 et 1,3 mg/m³ et pour des volumes de prélèvement inférieurs à 20 litres.

Dans les contextes d'humidité élevée dans les gaz du sol, il est recommandé de dimensionner les prélèvements de manière à ce que les masses de vapeur d'eau et de polluants ciblés soient inférieures à la capacité totale d'adsorption des supports. Un tel dimensionnement nécessite une pré-caractérisation à l'aide d'un PID lors de la purge pour adapter les volumes d'air à prélever (couplage durée, débit), les débits et les supports adsorbants (par exemple pour les charbons actifs, deux masses de charbon peuvent être utilisées : 100/50 et 400/200, le second ayant une capacité totale d'adsorption 4 fois plus élevée).

En outre, il convient de mentionner que l'analyse à conduire sur la zone de contrôle des supports adsorbants (recommandée par les guides BRGM-Ineris (2016) et FLUXOBAT (2013) et dans la norme ISO 18400-204) permet de valider que l'éventuelle compétition d'adsorption sur le charbon actif ne fausse pas le résultat de la mesure.

Enfin, il doit être tenu compte de l'objectif des mesures. La recherche de faibles concentrations avec les supports de type charbons actifs testés nécessite des prélèvements de grands volumes, ce qui peut être problématique en présence d'une humidité relative élevée. Cette situation n'a pas été étudiée dans le présent projet.

Purge préalable aux prélèvements

Dans le cadre du projet TEMPAIR, l'ensemble des travaux conduits sur les gaz du sol et présentés dans le livrable relatif à la partie 1 du projet TEMPAIR (Traverse et al. 2017) ont été réalisés après la purge des ouvrages à l'aide d'un PID (miniRAE3000). Les données ont été exploitées ici pour illustrer l'importance de cette opération préalable au prélèvement.

Ces mesures montrent que l'application d'un volume de purge théorique de 5 volumes morts (volume de gaz présent dans l'ouvrage) est suffisante dans certains cas pour atteindre une stabilité relative des concentrations, mais peut, dans d'autres cas, conduire à des concentrations non stabilisées.

Ces conditions non stabilisées rendent délicates la comparaison de concentrations mesurées entre différentes campagnes et dans certains cas la conduite de calculs de transfert. Par ailleurs, il a été montré que les évolutions de concentrations sont dépendantes des campagnes et des ouvrages, ce qui rend également délicate la généralisation des résultats d'une campagne à une autre.

Dans ce contexte, il est vivement recommandé de réaliser une purge jusqu'à stabilisation des concentrations. Pour ce faire, la réalisation de la purge avec un analyseur en ligne de type PID ou FID par exemple est particulièrement adaptée. En outre, l'utilisation de cet analyseur permet également de connaître l'ampleur de la contamination présente et ainsi d'adapter les volumes à prélever en fonction du risque de saturation du support.

Il est recommandé également de recueillir les évolutions de concentrations durant la purge lors des prélèvements, pour

disposer d'éléments d'interprétation sur la représentativité du prélèvement et la variabilité des concentrations entre chaque campagne de mesures.

Les documents relatifs au projet TEMPAIR sont disponibles sur le site de l'ADEME : <https://www.burgeap.fr/tempair/>

Une valorisation des résultats de la partie 1 de ce projet concernant la variabilité temporelle des concentrations en composés volatils dans les gaz du sol et l'air intérieur est sa poursuite au travers de la modélisation de cas-type dans le cadre du projet EFEMAIR [cf. partie dédiée].

Les travaux présentés ci-après s'inscrivent dans le prolongement de la partie 3 du projet TEMPAIR pour étudier l'impact des conditions de température et d'humidité sur les performances d'analyse sur charbon actif, support adsorbant utilisé couramment lors des prélèvements actifs de gaz du sol.

⁽⁵⁾ **Note de la rédaction : mis à jour en avril 2017**

⁽⁶⁾ **Traverse S. (BURGEAP), Chastanet J. (BURGEAP), Hulot C. (INERIS), Gleize T. (BURGEAP), Richez F. (INERIS), Dorffer L. (BURGEAP), 2017, « Projet TEMPAIR – partie 1, Variabilité temporelle des concentrations en PCE dans les gaz du sol et l'air intérieur », Mars 2017**

⁽⁷⁾ **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.**

⁽⁸⁾ **Traverse S. (BURGEAP), Hulot C. (INERIS), Gleize T. (BURGEAP), Richez F. (INERIS), Dorffer L. (BURGEAP), 2017. Projet TEMPAIR – partie 3, « 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 », Mars 2017**

Travaux complémentaires de l'Ineris dans le cadre du groupe de travail national «laboratoires»

Incidence de la température et de l'humidité sur l'adsorption de COV sur charbon actif pour la caractérisation des gaz (2019)

A l'heure actuelle en France, les prélèvements des gaz du sol sont le plus souvent réalisés par aspiration et adsorption sur charbons actifs. Récurrents dans les diagnostics de sites pollués, les défauts de caractérisation des concentrations peuvent générer des incertitudes parfois majeures dans la conduite des plans de gestion.

Ciblée comme pouvant être à l'origine de telles difficultés de caractérisation, l'influence de la température et de l'humidité relative sur l'adsorption d'hydrocarbures et de solvants chlorés sur les supports de type charbon actif a été l'objet d'études avec des essais conduits en conditions maîtrisées (chambre d'essais Ineris) ou contrôlées (sites expérimentaux (Chastanet et al., 2018 ; Traverse et al., 2017)).

La chambre d'exposition de l'Ineris (Gonzalez-Flesca et al., 2005) permet de simuler l'atmosphère à étudier dans des conditions expérimentales maîtrisées et répétables pour les paramètres tels que l'humidité, la température, la vitesse de l'air, et les concentrations.

Des essais ont été menés dans cette chambre en appui au ministère en charge de l'environnement sur les prélèvements des gaz du sol dans le cadre du GT national « laboratoires ».

Des prélèvements dynamiques ont ainsi été menés sur des tubes de charbon actif pour un mélange de BTEX et PCE, et à différents couplages température-humidité (20°C-50% / 20°C-70% / 20°C-90% / 10°C-50% / 10°C-70%).



Pour les conditions expérimentales étudiées (gamme de concentrations, mélange de substances, débits de pompage, volumes prélevés, températures, humidités), les résultats montrent l'absence de variations significatives des concentrations (dans la gamme de l'incertitude analytique de 20%), quels que soient le couple température/humidité relative étudié, et le type de support (petit et grand charbons actifs).

Ce travail a donné lieu à une présentation aux 4^{èmes} rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués organisées par l'ADEME : <https://www.rencontres-recherche-ssp2019.ademe.fr/>.

Projet EFEMAIR - 2018

Estimation de l'Influence de Facteurs Météorologiques sur les transferts de COV du sol vers l'AIR intérieur

Projet R&D co-financé par l'ADEME.

Auteurs : CHASTANET J., TRAVERSE S., DORFFER L., ESRAEL D., COME J.-M. (BURGEAP)

Le projet EFEMAIR se décline selon deux axes.

Axe 1⁽⁹⁾ : Variabilité des concentrations dans les gaz du sol et des transferts vers l'air intérieur des polluants volatils - Modélisation numérique de différentes configurations de sol, de pollution et de perméabilité de dalle de bâtiment

La présence de pollutions volatiles organiques dans les sols au droit des sites à passif environnemental nécessite de réaliser des diagnostics dans les gaz du sol et dans l'air intérieur en présence de bâtiment.

Si la conduite de telles études est bien encadrée par des guides techniques (MTES 2017, FLUXOBAT 2013, BRGM-Ineris 2016) et des normes sur la réalisation de mesures (dont ISO 18400-204,

2017 pour les gaz du sol), des incertitudes demeurent sur la représentativité de ces mesures (TEMPAIR, 2017).

L'axe 1 du projet EFEMAIR vise à mettre en exergue, pour différentes situations, les conséquences des épisodes de pluie successifs, de variations de pression atmosphérique et de variations de niveau de nappe sur les concentrations dans les gaz du sol et les flux vers l'air intérieur ou extérieur.

Cette analyse repose sur la modélisation numérique instationnaire, en 2 dimensions, des écoulements et du transport de pollutions gazeuses dans les sols et vers les compartiments air intérieur et extérieur sur une année environ.

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

Position de la source de pollution dans les sols	Lithologie	Qualité de dalle du bâtiment (dalle portée)
<ul style="list-style-type: none"> ■ Verticale (zone d'infiltration) sous, en limite ou en dehors de l'emprise du bâtiment 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Hétérogène (remblais / limons / sables) ■ Homogène sableux 	Dalle peu perméable (10^{-16} m^2) à Dalle perméable (10^{-12} m^2)
<ul style="list-style-type: none"> ■ Horizontale (remblais dégradés) sous l'emprise du bâtiment ■ Source de pollution présente dans la zone saturée (en nappe) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Homogène limoneux 	

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

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

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

En outre, la variabilité temporelle étant la plus importante dans les zones non imperméabilisées (sol nu par exemple) situés à proximité immédiate des zones dallées, la cartographie de la pollution devra, toutes choses égales par ailleurs, privilégier les prélèvements sous dalle en restant éloignés de ses bords.

Vis-à-vis des transferts vers l'air intérieur, dans les modélisations réalisées sur la base d'une dalle portée sans hétérogénéités ni chemins préférentiels (fissures de retrait, traversées de dalle par les réseaux divers : eau, gaz, électricité, ...), le tirage thermique influence peu les transferts moyens.

A noter que les chemins préférentiels de même que la ventilation des bâtiments, constituent des facteurs de variabilité spatio-temporelle non modélisés dans le projet mais qui nécessitent d'être pris en compte pour la mesure et l'interprétation des diagnostics (FLUXOBAT, 2013).

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

Axe 2⁽¹⁰⁾ : Évaluation des concentrations en hydrocarbures aliphatiques dans les gaz du sol - Influence de l'humidité relative et compétition d'adsorption entre hydrocarbures

La présence de pollutions organiques volatiles dans les sols nécessite la mesure des concentrations dans les gaz du sol en vue d'évaluer leurs impacts (MTES, 2017). Le BRGM et l'Ineris (2016) recommandent pour les hydrocarbures C5-C16 des prélèvements par canister ou par supports adsorbants (charbons actifs ou autres à désorption thermique). A l'heure actuelle en France, les prélèvements des gaz du sol sont le plus souvent réalisés par aspiration et adsorption sur charbons actifs.

En présence de vapeur d'eau comme en présence d'une pollution multi-composés, des phénomènes de compétition d'adsorption peuvent se produire sur le charbon actif, surtout si les différences d'affinité avec le support adsorbant ou les différences de concentration sont importantes. Récurrents dans les diagnostics de sites pollués, les défauts de caractérisation des concentrations en hydrocarbures dans les gaz du sol génèrent des incertitudes parfois majeures dans la conduite des plans de gestion (MTES, 2017), lesquels visent à définir les actions à entreprendre pour la réduction ou la maîtrise des pollutions et de leurs impacts.

Dans ce contexte, l'axe 2 du projet EFEMAIR vise à analyser, à partir de mesures conduites sur un site atelier, les phénomènes de compétition d'adsorption lors des prélèvements sur charbon actif d'hydrocarbures aliphatiques C4-C10.

Ont été mesurées pour différentes concentrations et volumes de prélèvement, les incidences de la compétition d'adsorption sur les masses d'hydrocarbures adsorbés ainsi que l'influence de la mise en place d'un dessiccateur sur la ligne de prélèvement.

Deux filtres anti-humidité ont été testés. Ces travaux sur l'humidité relative pour les hydrocarbures aliphatiques complètent ceux présentés par Traverse et al. (2017) qui portaient sur des pollutions au tétrachloroéthylène et au trichloroéthylène.

Vis-à-vis de l'influence de l'humidité résiduelle dans les gaz du sol, les expérimentations réalisées montrent que la mise en série de dessiccateurs ne semble pas avoir d'incidence significative sur l'adsorption des mélanges d'hydrocarbures aliphatiques sur les charbons actifs de marque SKC dans la gamme de concentrations de 500 à 46 000 mg/m³ et pour des volumes prélevés entre 5 et 15 litres. Ceci est vraisemblablement lié à la présence dans

le mélange de molécules hydrocarbonées dont la température d'ébullition est supérieure à celle de l'eau.

Pour les mélanges testés, l'adsorption des hydrocarbures aliphatiques <C7 serait réduite par la présence d'hydrocarbures >C7 venant déloger les molécules d'eau et les hydrocarbures plus légers. Cette compétition d'adsorption explique les résultats obtenus, mettant en évidence une masse plus importante d'hydrocarbures C3 à C7 en zone de contrôle par rapport à la zone de mesure des charbons actifs pour certains échantillons dont les volumes prélevés sont proches ou supérieurs au volume de perçage.

Quels que soient les volumes prélevés, les hydrocarbures >C8 ne sont pas retrouvés en zone de contrôle ou dans le flux en aval, ce qui montre que la présence de vapeur d'eau ou d'autres hydrocarbures ne perturbe pas leur adsorption.

Ainsi, il est recommandé de privilégier des prélèvements sans support adsorbant pour les mélanges fortement concentrés en hydrocarbures aliphatiques et contenant à la fois des fractions légères et lourdes afin que les fractions les plus volatiles ne soient pas sous-estimées. Dans le cas où le prélèvement est réalisé avec des charbons actifs, il est recommandé d'adapter les volumes de prélèvement, afin de veiller à ne pas saturer les supports, par exemple avec un analyseur en ligne en aval de la ligne de prélèvement.

Les documents relatifs au projet EFEMAIR sont disponibles sur le site de l'ADEME : <https://www.ademe.fr/projet-efemair>

⁽⁹⁾ Chastanet J., Traverse S., Côme JM. (2018). **Axe 1-Variabilité des concentrations dans les gaz du sol et des transferts vers l'air intérieur des polluants volatils. Modélisation numérique de différentes configurations de sol, de pollution et de perméabilité de dalle de bâtiment. Projet EFEMAIR. Collection expertise ADEME. Mai 2018. 33pp.**

⁽¹⁰⁾ Traverse S., Dorffer L., Esrael D., Côme J.M. (2018). **Projet EFEMAIR. Axe 2-Evaluation des concentrations en hydrocarbures aliphatiques dans les gaz du sol. Influence de l'humidité relative et compétition d'adsorption entre hydrocarbures. Collection expertise ADEME. Mai 2018. 35 pp.**

 **Projet AGIR-QAI⁽¹¹⁾ - 2013**

Amélioration des outils de Gestion de l'Impact des polluants gazeux des sols en Relation avec la Qualité de l'Air Intérieur des bâtiments

Projet R&D co-financé par l'ADEME dans le cadre de l'Appel à projets GESIPOL

Auteurs : COLLIGNAN B., DIALLO Thierno M.O. et POWAGA E. (CSTB)

Une forte pression socio-économique s'exerce pour la reconversion de friches industrielles, souvent situées en zone péri urbaines et pouvant présenter des pollutions résiduelles. Les vapeurs issues de polluants gazeux du sol peuvent pénétrer dans les bâtiments principalement par transport convectif et diffusif, à travers plusieurs types d'entrée : les fissures, les trous, les traversées de réseau (eau, électricité, plomberie...), la macroporosité des matériaux des fondations et plus généralement à travers toutes les surfaces en contact avec le sol.

L'entrée de polluants gazeux venant du sol dans les environnements intérieurs peuvent entraîner des situations de risques

⁽¹¹⁾ ADEME, 2013. **Document de synthèse du projet AGIR-QAI : Amélioration des outils de Gestion de l'Impact des polluants gazeux des sols en Relation avec la Qualité de l'Air Intérieur des bâtiments. 31 p.**

sanitaires accrus. Dans ce contexte, le projet AGIR-QAI avait comme objectifs de mieux appréhender les flux de contaminants des sols vers les environnements intérieurs, notamment par une meilleure compréhension des transferts gazeux vers les bâtiments.

Un des principaux enjeux associés à la pollution résiduelle dans les sols réside dans le fait de rendre les terrains concernés viables pour la construction de bâtiments d'habitation ou tertiaires. Les outils d'évaluation des risques liés à ces polluants utilisés classiquement (modèles analytiques 1D simplifiés : Johnson et Ettinger, 1991, Waitz et al. 1996, Bakker et al. 2008) comportent des incertitudes fortes quant à la connaissance de certains paramètres et notamment ceux relatifs à l'interface sol-bâtiment et à la prise en compte des phénomènes de transport au niveau de cette interface.

Ces incertitudes peuvent conduire à une mauvaise appréciation des risques ne permettant pas une gestion optimale des situations. Ainsi, dans le cadre d'aménagement à usage d'habitat ou de tertiaire sur d'anciennes friches industrielles, il n'est pas rare que les coûts pour la protection des bâtiments vis-à-vis d'agents chimiques présents dans les sols se révèlent excessifs, si l'évaluation du risque a été mal appréciée.

Par ailleurs, il paraît important de développer des stratégies de protection des bâtiments (existants ou prévisionnels) vis-à-vis de ces pollutions gazeuses venant du sol.

Axe 1 : Développement de modèles analytiques gérant les flux de polluants gazeux du sol en fonction des typologies de soubassement de bâtiments

Dans un premier temps, les modèles d'évaluation des expositions intérieures utilisés pour l'évaluation des risques sanitaires ont été améliorés par la prise en compte plus réaliste des débits d'air venant du sol ainsi que des principaux phénomènes de convection et diffusion à l'interface entre le sol et le bâtiment en considérant différentes typologies de soubassement.

Ont ainsi été développés des modèles analytiques tenant compte des débits d'air dus à la convection à travers le sol pour différents types de soubassement : dallage indépendant, dalle portée, vide sanitaire et cave, bâtiments avec des murs enterrés et soubassements avec un lit de gravier sous le plancher. Une méthodologie permettant la prise en compte de la fissuration et des points singuliers du plancher bas est aussi proposée.

Une étude numérique portant sur la prise en compte du transfert couplé des polluants des sols par convection et diffusion auprès des fondations a permis une meilleure compréhension du comportement des polluants à l'interface sol/bâtiment et de proposer des lois semi-empiriques d'estimation des flux d'entrée de polluants dans les bâtiments.

Les différents modèles semi-empiriques développés ont été validés numériquement avec un modèle de simulation des écoulements (Computational Fluid Dynamic – CFD) et expérimentalement avec des données issues de la littérature.

La confrontation de ces modèles semi-empiriques avec les modèles existants a montré les améliorations apportées en termes d'évaluation des concentrations intérieures liées aux polluants

gazeux du sol, le débit d'air dépendant fortement de la typologie du soubassement.

Les modèles semi-empiriques relatifs à l'évaluation des débits d'air venant du sol ainsi que des débits de polluants venant du sol ont ensuite été intégrés dans un code de simulation thermo-aéraulique multizones, afin de pouvoir étudier l'impact des polluants sur la qualité de l'air intérieur selon différentes typologies de soubassement.

Cette intégration a démontré la robustesse des lois développées. Un avantage majeur de ces modèles est de pouvoir ainsi conduire des études de sensibilité, couplant facilement les interactions entre le milieu « sol » et le milieu « bâtiment », cette interaction étant très difficile voire impossible à représenter avec des modèles complets type CFD par exemple.

De nouvelles confrontations expérimentales devraient être conduites afin d'avoir une plus grande exhaustivité de situations comparées (source de polluant latérale au bâtiment, bio-dégradation de certains polluants) et d'asseoir la pertinence des lois semi-empiriques développées.

Axe 2 : Evaluation des performances et optimisation du dimensionnement d'un Système de Dépressurisation des Sols (SDS) naturel

Dans un second temps, l'étude a permis de développer un modèle de dimensionnement des conditions de fonctionnement des Systèmes de Dépressurisation du Sol (SDS) passifs (ou naturels) utilisés pour protéger les bâtiments des pollutions gazeuses venant du sol.

Le modèle aéraulique de dimensionnement des SDS a été intégré dans un modèle aéraulique du bâtiment, afin de pouvoir en étudier son fonctionnement. L'ensemble a été validé en le confrontant à des mesures effectuées au CSTB dans une maison expérimentale.

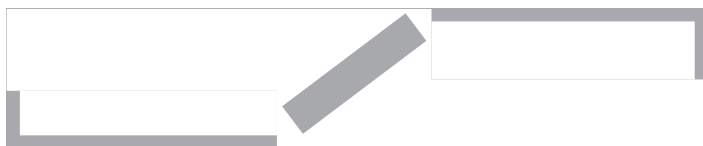
Les premières applications du modèle de dimensionnement portent notamment sur l'impact de la météorologie (vent et tirage thermique) et sur l'impact des stratégies de ventilation du bâtiment sur le fonctionnement du SDS passif. On voit ainsi l'intérêt de l'utilisation d'un tel modèle pour tester l'aptitude de ce système de protection des bâtiments dans des situations environnementales données.

Sur la base de ces développements et résultats, un prototype d'outil de dimensionnement a été réalisé afin de tester l'aptitude mécanique d'un SDS passif en fonction de certaines caractéristiques du bâtiment, de son environnement et de données météorologiques.

Le rapport final du projet est disponible sur le site de l'ADEME : <https://www.ademe.fr/agir-qai-amelioration-outils-gestion-limpact-polluants-gazeux-sols-relation-qualite-lair-interieur-batiments>.

Les résultats de cette étude et les modèles développés à cette occasion ont été exploités dans le cadre des projets CAPQAI et EVALSDS présentés ci-après.





Projet CAPQAI - 2018

Méthodologie de caractérisation des sols pollués pour l'évaluation de leur impact sur les expositions intérieures dans les bâtiments s'appliquant aux futurs bâtiments qui seraient construits sur des terrains présentant des pollutions résiduelles volatiles

Projet R&D co-financé par l'ADEME dans le cadre de l'APR GESIPOL

Auteurs : COLLIGNAN B. (CSTB), POWAGA E. (CSTB), ABADIE M. (LaSIE), CHASTANET J. (BURGEAP), GRASSET M. (Lyon Métropole), HULOT C. (Ineris), TRAVERSE S. (BURGEAP).

Le projet CAPQAI vise à compléter les outils et les méthodes se référant à l'évaluation des impacts des pollutions volatiles du sol vers l'air intérieur permettant, d'une part, de caractériser in situ les flux de pollutions volatiles depuis les sols pollués vers l'air, et d'autre part, d'évaluer leur impact sur la qualité de l'air des environnements intérieurs de futurs bâtiments qui seraient construits sur ces parcelles, dans le cadre de projet de reconversion.

Le livrable public décline les grands principes de la méthodologie de caractérisation des sols pollués pour l'évaluation de leur impact sur les expositions intérieures dans des bâtiments futurs selon trois étapes principales, à savoir :

- Caractérisation expérimentale de flux de polluants venant du sol,
- Évaluation de « source homogène équivalente » de pollution,
- Estimation de la concentration intérieure dans un bâtiment.

Le développement des principes a ensuite été réalisé à partir d'une condition réelle de site pollué. Enfin une analyse critique a été portée sur les limites et potentialités de cette méthodologie vis-à-vis des typologies de pollution des sols, des conditions d'expérimentation et d'interprétation et d'utilisation des résultats. Cette analyse fait ressortir l'intérêt de l'utilisation de cet outil en complément des outils de gestion actuels.

Néanmoins, si les résultats obtenus sont encourageants, on notera que la connaissance des paramètres d'entrée est primordiale dans l'utilisation de modèles analytiques pour l'évaluation des impacts dans l'air intérieur, notamment les propriétés du sol (perméabilité à l'air et coefficient de diffusion du polluant).

Enfin, il apparaît que cette méthodologie serait plus adaptée à une typologie de pollution du sol qui serait située au droit, plutôt qu'en latéral, d'un futur bâtiment. Aussi, et vue la disparité potentielle des situations de pollutions des sols pouvant être rencontrées, il apparaît important de tester cette méthodologie sur d'autres sites, afin de conforter sa pertinence pour d'autres configurations.

Les documents relatifs au projet CAPQAI sont disponibles sur le site de l'ADEME : <https://www.ademe.fr/projet-capqai>



Projet EVALSDS - 2018

EVALuation de la performance des Systèmes de Dépressurisation du Sol à fonctionnement naturel.

Projet R&D co-financé par l'ADEME dans le cadre de l'appel à projets CORTEA.

Auteurs : ALLARD F. (LaSIE), ABADIE M. (LaSIE), ROMANI Z. (LaSIE), BURLOT M. (LaSIE), COLLIGNAN C. (CSTB), DRUETTE L. (CERIC), PEIGNÉ P. (CERIC), NICOLLE J. (Tipee).

Le projet « EVALuation de la performance des Systèmes de Dépressurisation du Sol à fonctionnement naturel (EVALSDS) » vise à l'évaluation expérimentale et à la modélisation de la performance des mesures de réduction du transfert des polluants gazeux du sol vers les environnements intérieurs des bâtiments par des Systèmes de Dépressurisation du Sol (SDS) à fonctionnement naturel (ou passif).

Les expérimentations en vraie grandeur (maison neuve Eurêka équipée) ont permis de valider un modèle de dimensionnement de ce type de système avec lequel des études paramétriques ont été conduites pour définir le domaine de fonctionnement.



Maison expérimentale Eurêka (projet EVALSDS)

Les résultats des essais dans la maison test ont permis de quantifier l'augmentation des débits extraits induits par un chapeau extracteur statique optimisé par rapport à un chapeau plus standard.

Ce chapeau a également montré une capacité à limiter la durée d'inversion d'écoulement d'air dans le conduit du SDS et donc un meilleur fonctionnement du système. De plus, les mesures ont montré qu'une surpression du bâtiment (représentative d'un système de ventilation par soufflage ou double-flux) permet d'augmenter les débits extraits et de limiter les inversions.

A l'inverse, un système de ventilation par extraction (mise en dépression du bâtiment) augmente les risques d'inversion et induit des débits extraits plus faibles.

L'évaluation de la performance d'un SDS passif sous différentes conditions climatiques représentatives du territoire métropolitain français à l'aide du modèle de dimensionnement a permis de faire ressortir que, pour des bâtiments de faible hauteur (jusqu'à R+4), un conduit de 20 cm de diamètre permet d'obtenir une efficacité optimale.

Ce modèle a également confirmé les observations expérimentales concernant l'amélioration de l'efficacité du système avec un chapeau extracteur statique optimisé.

Par contre, la performance de l'extraction se détériore lorsque le système est installé sur un bâtiment en dépression (VMC par extraction), et cela d'autant plus vite que la perméabilité de la dalle aux flux de vapeurs est élevée.

Enfin, un guide a été rédigé à destination des professionnels du bâtiment pour concevoir, dimensionner, installer et maintenir ce type de système pour des bâtiments neufs.

Les documents relatifs au projet EVALSDS sont disponibles sur le site de l'ADEME : <https://www.ademe.fr/evaluation-performance-systemes-depressurisation-sol-a-fonctionnement-naturel-l>



Projet BATICOV - 2017

Mesures constructives vis-à-vis des pollutions volatiles du sol vers les bâtiments

Projet R&D co-financé par l'ADEME dans le cadre de l'appel à projet GESIPOL

Auteurs : TRAVERSE S. (BURGEAP), ALEM C. (BURGEAP), CASAL A., CESSAC C. (Cabinet BRUN CESSAC et Associés), COLLIGNAN B. (CSTB), COME J.-M. (BURGEAP), DABONNEVILLE M. (TERAO), DESROUSSEAUX M. (Cabinet BRUN CESSAC et Associés), GRASSET M. (Métropole de Lyon), HULOT C. (Ineris), PACCOUD C., POWAGA E. (CSTB), RAOUST M. (TERAO).

Après d'éventuelles opérations de dépollution des sols, les bâtiments construits sur des sites présentant des pollutions volatiles résiduelles intègrent généralement des mesures constructives permettant de limiter les impacts sur la qualité de l'air intérieur.

Le projet BATICOV (2015-2017) avait pour objectifs d'apporter un éclairage sur les freins et leviers associés à l'efficacité des mesures constructives, puis dans un second temps, de développer des outils permettant d'améliorer les pratiques pour l'ensemble des acteurs intervenant de la programmation à l'exploitation d'un bâtiment.

La première partie du projet intitulée : « **État des lieux et axes d'amélioration de la programmation à l'exploitation**⁽¹⁵⁾ » a été réalisée à travers des enquêtes auprès d'acteurs de la maîtrise d'ouvrage, des bureaux d'études en sites et sols pollués et des DREAL, des interviews et la conduite d'ateliers réunissant les acteurs de la construction (maître d'ouvrage, maître d'œuvre, bureaux d'études techniques, entreprises, Collectivités et Services de l'Etat) et de manière prospective, l'analyse du contenu de certifications environnementales du bâtiment (NF HQE, WELL, BREEAM et LEED) vis-à-vis de la qualité de l'air intérieur.

Cet état des lieux porte essentiellement sur la construction de bâtiments neufs. Pour les bâtiments existants, l'analyse des mesures correctives mises en œuvre sur une vingtaine de bâtiments a été conduite.

Pour les bâtiments neufs, le panel des mesures constructives issu de l'enquête auprès des maîtres d'ouvrage publics ou privés et bureaux d'études en sites et sols pollués fait ressortir une majorité de dispositifs passifs et une grande part liée au mode constructif.

Il est observé une part limitée portant sur la modification de la ventilation dans les lieux de vie, l'étanchéité de l'interface sol-bâtiment et le déploiement de Systèmes de Dépressurisation

du Sol (SDS). Les difficultés rencontrées sont nombreuses et de natures diverses :

- Difficultés techniques et scientifiques : connaissance des mesures constructives, efficacité théorique, absence pour certaines d'entre elles de documents techniques (Document Technique Unifié, Avis Technique, Appréciation Technique d'expérimentation), limites des études de conception, confiance dans les outils déployés dans les études de pollution, éléments clés de mise en œuvre, besoin d'entretien et de maintenance... ;
- Difficultés organisationnelles : temporalité entre les études de sol et la conception du bâtiment, cloisonnement des métiers et attendus du code de l'environnement et du code de la construction, ... ,
- Difficultés de communication : difficultés d'échanges techniques entre acteurs de profils et de sensibilités très différentes, acceptation par l'acquéreur du bâtiment et les usagers des mesures constructives, transmission de l'information quant aux contraintes et besoins envers l'acquéreur du bâtiment et les usagers... ,
- Difficultés réglementaires et méthodologiques : absence d'obligations / de contraintes au-delà de l'attestation sur la prise en compte de la pollution des sols à fournir lors de la demande du permis de construire, des servitudes et des Secteurs d'Information sur les Sols (SIS)⁽¹⁶⁾ , absence d'organisme de contrôle en construction et exploitation, absence d'identification d'une mission spécifique sol dans l'acte de construire...

Dans la synthèse réalisée, sont présentés les axes de développements portant sur les différents sujets mentionnés ci-avant. Il s'agit en particulier des points d'attentions en lien avec les différentes phases de la construction, la communication avec l'acquéreur et l'utilisateur et les contrôles tant à réception que durant l'exploitation.

Par ailleurs, le besoin de sensibilisation et de formation de l'ensemble des acteurs intervenant sur le sujet est identifié, ce qui permet de mieux appréhender le sujet et la responsabilité de ces acteurs.

L'efficacité des mesures constructives mises en œuvre dans les bâtiments se réfère à l'atteinte de l'objectif de réduction des concentrations dans l'air intérieur de telle manière qu'elles soient acceptables du point de vue de la santé des occupants. Pour cela, les points d'attention sont particulièrement développés dans la deuxième partie du projet intitulée : « **Outils de la programmation à l'exploitation**⁽¹⁷⁾ ».

⁽¹⁵⁾ Traverse S., Alem C., Casal A., Cessac C., Collignan B., Côme J.M., Dabonneville M., Desrousseaux M., Grasset M., Hulot C., Paccoud C., Powaga E., Raoust M.. 2017. **Projet BATICOV . Mesures constructives vis-à-vis des pollutions volatiles du sol. Etat des lieux et axes d'amélioration de la programmation à l'exploitation des bâtiments.** Collection expertise ADEME. Novembre 2017. 92 pp+annexes

⁽¹⁶⁾ Les SIS constituent un nouvel outil réglementaire créé par la loi ALUR de 2014. Ils comprennent les terrains où la connaissance de la pollution des sols justifie, notamment en cas de changement d'usage, la réalisation d'études de sols et la mise en place de mesures de gestion de la pollution pour préserver la sécurité, la santé ou la salubrité publique et l'environnement. Ils sont mis à disposition du public après consultation des mairies et information des propriétaires.

⁽¹⁷⁾ Traverse S., Cessac C., Collignan B., Côme J.M., Desrousseaux M., Grasset M., Hulot C., Raoust M.. 2018. **Projet BATICOV. Mesures constructives vis-à-vis des transferts de pollutions volatiles du sol vers les bâtiments. Outils méthodologiques de la programmation à l'exploitation des bâtiments.** Collection expertise ADEME. Novembre 2017. 58 pp

Les outils présentés dans ce projet sont :

- des schémas par phase (programmation, conception, construction et exploitation) où sont identifiés les acteurs concernés, les actions à mettre en œuvre, et les points d'attention nécessaires ;
 - une description, les enjeux et les points d'attentions pour les différents types de mesures constructives : Etanchéité de l'interface sol-bâtiment ; Vide sanitaire ventilé ; Système de Dépressurisation des Sols ; Ventilation des lieux de vie et sous-sols.
- Quatre fiches « Enjeux techniques » ont été établies pour chacune des familles de mesures constructives et permettent d'en comprendre le principe, d'identifier les points clés intervenant dans l'efficacité de la technique, leur complémentarité et les interactions entre les acteurs intervenant dans les choix, le dimensionnement, la mise en œuvre et l'exploitation ;
- à vocation pédagogique et de sensibilisation pour permettre aux acteurs de se familiariser avec les mesures constructives, anticiper les enjeux associés et les points d'attention auxquels ils seront confrontés.

Pour cela, 6 fiches « Acteurs » ont été établies respectivement, à destination du maître d'ouvrage, du maître d'œuvre, du bureau d'étude Sites et Sols pollués, des entreprises de construction, de l'acquéreur, exploitant ou usager et de la collectivité ou des services de l'État.

En outre, ces fiches illustrent la multidisciplinarité requise et le besoin essentiel de ne pas cloisonner les missions en identifiant les interactions nécessaires. Le besoin d'anticipation y est particulièrement souligné, car leur mise en place de manière curative pour bloquer un transfert a posteriori est nettement plus complexe.

Les documents relatifs au projet BATICOV sont disponibles sur le site de l'ADEME : <https://www.ademe.fr/baticov-mesures-constructives-vis-a-vis-pollutions-volatiles-sol-programmation-a-exploitation-batiments-apr-gesipol-2014>

Références

ADEME, 2013. ATTENA, Mode Opératoire – Apports et limitations de l'analyse des gaz du sol 2013

ADEME, 2013. Document de synthèse du projet AGIR-QAI : Amélioration des outils de Gestion de l'Impact des polluants gazeux des sols en Relation avec la Qualité de l'Air Intérieur des bâtiments. 31 p.

ADEME, 2013a. CITYCHLOR - Technical Report - Soil-gas monitoring: soil-gas well designs and soil-gas sampling techniques. Rapport INERIS-DRC-13-114341-03542A ; Accessible sur <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. Rapport INERIS-DRC-10-109454-02386B ; Accessible sur <http://www.citychlor.eu/>

Bakker J., Lijzen J.P.A., van Wijnen H.J., 2008. Site-specific human risk assessment of soil contamination with volatile compounds. RIVM (National Institute of Public Health and the Environment Bilthoven, the Netherlands) report no. 711701049, 140 p.

Allard F., Abadie M., Romani Z., Burlot M., Collignan C., Druette L., Peigné P., Nicolle J., 2018. Evaluation de la Performance des Systèmes de Dépressurisation du Sol à Fonctionnement Naturel. 106 pages.

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

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

Collignan B., Powaga E., Abadie M., Chastanet J., Grasset M., Hulot C., Traverse S., 2018. Projet CAPQAI - Livrable public : Méthodologie de caractérisation des sols pollués pour l'évaluation de leur impact sur les expositions intérieures dans les bâtiments. 28 pages.

Gonzalez-Flesca, N. et Frezier, A., 2005. A new laboratory test chamber for the determination of diffusive sampler uptake rates. Atmospheric Environment, 39: p. 4049-4056

Hulot C. (INERIS), Traverse S. (BURGEAP), Richez F. (INERIS), Gleize T. (BURGEAP), 2017. Projet TEMP AIR – partie 2. Evaluation des échantillonneurs passifs pour le PCE dans les gaz du sol. Mars 2017.

Johnson P. C., and R. A. Ettinger., 1991. Heuristic model for predicting the intrusion rate of contaminant vapors into buildings. Environ. Sci. Technology, 25 :1445-1452.

Millington & Quirk, 1961. Permeability of Porous Solids, Trans. Faraday Soc, 57, (1961), 1200-1207.

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

Traverse S., Alem C., Casal A., Cessac C., Collignan B., Côme J.M., Dabonneville M., Desrousseaux M., Grasset M., Hulot C., Paccoud C., Powaga E., Raoust M., 2017. Projet BATICOV. Mesures constructives vis-à-vis des pollutions volatiles du sol. Etat des lieux et axes d'amélioration de la programmation à l'exploitation des bâtiments. Collection expertise ADEME. Novembre 2017. 92 pp+annexes

Traverse S., Cessac C., Collignan B., Côme J.M., Desrousseaux M., Grasset M., Hulot C., Raoust M., 2018. Projet BATICOV. Mesures constructives vis-à-vis des transferts de pollutions volatiles du sol vers les bâtiments. Outils méthodologiques de la programmation à l'exploitation des bâtiments. Collection expertise ADEME. Novembre 2017. 58 pp

Traverse S., Chastanet J., Hulot C., Gleize T., Richez F., Dorffer L., 2017. Projet TEMP AIR – partie 1. Variabilité temporelle des concentrations en PCE dans les gaz du sol et l'air intérieur. Mars 2017

Traverse S., Dorffer L., Esrael D., Côme J.M., 2018. Projet EFEMAIR. Axe 2-Evaluation des concentrations en hydrocarbures aliphatiques dans les gaz du sol. Influence de l'humidité relative et compétition d'adsorption entre hydrocarbures. Collection expertise ADEME. Mai 2018. 35 pp.

Traverse Sylvie et Hulot Corinne, 2019. Incidence de l'humidité sur l'adsorption de COV sur charbon actif pour la caractérisation des gaz. Quatrième Rencontres nationales de la Recherche sur les sites et sols pollués. Montrouge le 26 et 27 novembre 2019.

Traverse S., Hulot C., Gleize T., Richez F., Dorffer L., 2017. Projet TEMP AIR – partie 3. 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. Mars 2017

Traverse S., Schäfer G., Chastanet J., Hulot C., Perronnet K., Collignan B., Cotel S., Marcoux M., Côme J.M., Correa J., Gay G., 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

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. Bilthoven, the Netherlands: National Institute for public Health and the environment (RIVM). RIVM report no.715810014.