



Juin
2018

PROJET CAPQAI

LIVRABLE PUBLIC

**METHODOLOGIE DE CARACTERISATION DES SOLS
POLLUES POUR L'EVALUATION DE LEUR IMPACT SUR
LES EXPOSITIONS INTERIEURES DANS LES BATIMENTS**

Rapport Public



Etude réalisée pour le compte de l'ADEME en partenariat avec : CSTB (coordinateur), BURGEAP, INERIS, LaSIE-Tipee, Grand Lyon

GRANDLYON



CSTB
le futur en construction

GINGER
BURGEAP



INERIS
réduire le risque
pour un développement durable

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Franck Marot de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Direction Ville et Territoire Durable - Services Friches Urbaines et Sites Pollués) et Ingénieur référent pour le suivi technique de ce projet.

Les auteurs remercient plus particulièrement la métropole de Lyon pour la mise à disposition du site atelier.

CITATION DE CE RAPPORT

Bernard Collignan, Emilie Powaga, Marc Abadie, Juliette Chastanet, Marie Grasset. Corinne Hulot, Sylvie Traverse, 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. Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque

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

Ce document est diffusé par l'ADEME

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

Numéro de contrat : 1572C0002

Étude réalisée par le CSTB (coordinateur), BURGEAP, INERIS, LaSIE-Tipee, Grand Lyon pour ce projet cofinancé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : CSTB
Appel à projet de recherche : GESIPOL « Recherche pour la gestion intégrée des sites pollués »

Coordination technique - ADEME : MAROT Franck
Direction/Service : Friches Urbaines et Sols Pollués



Sommaire

Introduction	5
1 Présentation de la méthodologie	6
1.1 Généralités sur le transfert des polluants du sol	6
1.2 Rappel des objectifs et méthode	7
1.3 Caractérisation expérimentale de flux de polluants venant du sol	7
1.4 Evaluation de « source homogène équivalente » de pollution	8
1.4.1 Présentation des modèles analytiques utilisés	8
1.4.2 Estimation de la « source homogène équivalente »	9
1.4.3 Estimation de la perméabilité à l'air équivalente du sol	9
1.5 Estimation de la concentration intérieure dans un bâtiment.....	9
1.5.1 Modèles analytiques	9
1.5.2 Modèle de ventilation du bâtiment	10
1.6 Résultats de la méthodologie	11
2 Mise en œuvre de la méthodologie sur un site réel	11
2.1 Caractérisation expérimentale	11
2.1.1 Description du site.....	11
2.1.2 Moyens mis en oeuvre	12
2.1.2.1 Métrologie de terrain.....	12
2.1.2.2 Caisson expérimental	13
2.1.3 Résultats expérimentaux.....	14
2.2 Evaluation de « source homogène équivalente »	15
2.3 Evaluation de la perméabilité à l'air équivalente du sol.....	16
2.4 Estimation de la concentration intérieure dans un bâtiment.....	17
2.4.1 Présentation de l'étude de sensibilité	17
2.4.2 Résultats	18
2.4.3 Analyse.....	20
3 Analyse de la méthodologie	21
3.1 Typologie de pollution des sols au regard du bâtiment	21
3.2 Localisation du caisson.....	22
3.3 Réalisation des essais	22
3.4 Interprétation des résultats	23
3.5 Exploitation des résultats.....	23
4 Synthèse.....	23
Références bibliographiques	25
Index des tableaux et figures	26



Résumé

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 bâtiments qui seraient construits sur ces parcelles.

Ce livrable public présente tout d'abord les grands principes de la méthodologie qui se décompose en trois étapes principales, à savoir :

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

Son cadre expérimental de test in-situ est ensuite présenté. Enfin une analyse critique des limites et potentialités de cette méthodologie fait ressortir l'intérêt de cet outil à utiliser en complémentarité des outils de gestion actuels.

Néanmoins, si les résultats obtenus sont encourageants, on notera que la connaissance des paramètres d'entrée 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 d'un futur bâtiment. Aussi, et vu 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 sur d'autres configurations.

Abstract

The CAPQAI project aims to complete the tools and methods that allow, on the one hand, to characterize in situ volatile pollution fluxes from polluted soils to air, and on the other hand to evaluate their impact on the air quality of the indoor environments of buildings that would be built on these parcels.

This public deliverable first presents the main principles of the methodology that can be divided into three main stages, namely:

- Experimental characterization of the pollutant flux coming from the soil
- Evaluation of "equivalent homogeneous source" of pollution
- Estimation of the indoor concentration in a building

Its experimental framework for in-situ testing is then presented. Finally, a critical analysis of the limits and potentialities of this methodology highlights the interest of this tool to be used in complementarity of current management tools.

Nevertheless, if the results obtained are encouraging, it will be noted that knowledge of the input parameters in the use of analytical models for the assessment of impacts in indoor air, including soil properties (air permeability and coefficient of diffusion of the pollutant). Finally, it appears that this methodology would be more suited to a typology of soil pollution that would be located at the right of a future building. Also, and given the potential disparity of soil pollution situations that may be encountered, it seems important to test this methodology on other sites to confirm its relevance to other configurations.



Introduction

Le projet CAPQAI vise à compléter les outils et les méthodes 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 bâtiments qui seraient construits sur ces parcelles.

Le présent rapport présente la méthodologie de caractérisation des sols pollués pour l'évaluation de leur impact sur les concentrations intérieures développée dans le cadre de ce projet, formule des recommandations et présente une analyse des potentialités et limites, quant à l'utilisation de cette méthodologie développée, en soutien à la méthodologie actuelle dans le domaine des sites et sol pollués. Ce rapport se structure en trois parties :

- Présentation de la méthodologie.
- Cadre de développement et d'utilisation de la méthodologie.
- Analyse de la pertinence et des limites potentielles de cette méthodologie.



1 Présentation de la méthodologie

1.1 Généralités sur le transfert des polluants du sol

L'entrée des polluants gazeux venant du sol dans un bâtiment résulte de nombreux paramètres environnementaux (concentration dans le sol et/ou les eaux souterraines, perméabilité et humidité du sol, présence de fissures ou de fractures dans la roche sous-jacente, conditions météorologiques, battement éventuel de nappe phréatique) ainsi que des caractéristiques propres au bâtiment (système constructif, fissuration de la surface en contact avec le sol, système de ventilation...).

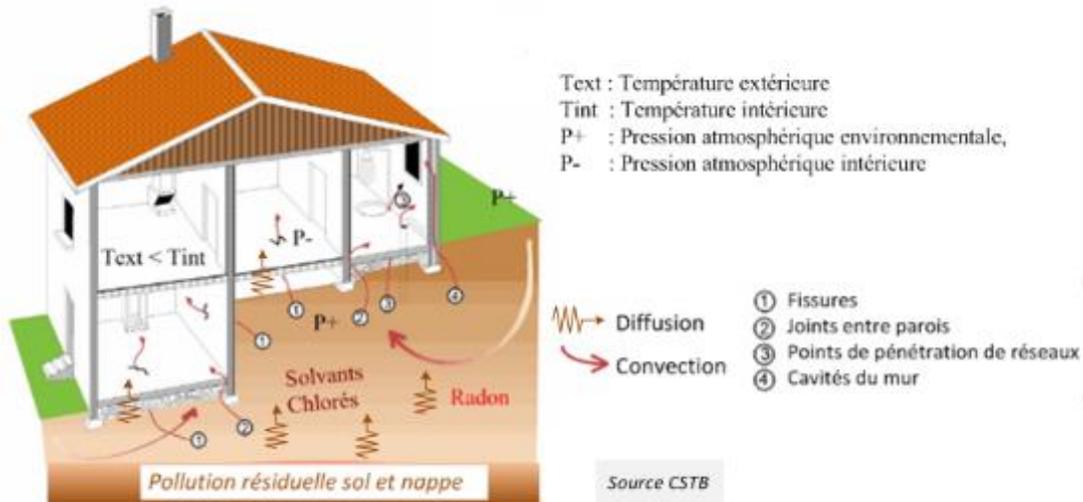


Figure 1 : Entrée des polluants gazeux du sol dans les bâtiments

Les polluants gazeux du sol entrent principalement par les défauts d'étanchéité (fissures, joints, perforations, réseaux) de l'enveloppe du bâtiment en contact avec le sol, par transfert convectif de l'air contenu dans la porosité du sol. Ils entrent également par transfert diffusif à travers les matériaux. Le bâtiment, lieu relativement confiné et dont l'étanchéité avec le sol est plus ou moins bonne, peut ainsi accumuler ces polluants gazeux.

Transfert convectif

En période de chauffage, l'air intérieur du bâtiment est plus chaud que l'air extérieur. Ceci entraîne un mouvement d'air dans le bâtiment appelé le " tirage thermique ". Ce tirage thermique génère une légère dépression au niveau du sol du bâtiment vis-à-vis de son environnement extérieur et notamment du sol sous le bâtiment. Le moteur de la convection est donc la différence de pression qui existe entre le sol et l'intérieur du bâtiment, qui entraîne un mouvement d'air depuis le sol vers le bâtiment. Les polluants gazeux du sol, présents dans l'air contenu dans la porosité du sol, sont alors aspirés dans le bâtiment et y séjourneront en fonction du niveau de renouvellement d'air de ce dernier.

On peut noter également que les battements de nappe phréatique ainsi que les infiltrations de pluies peuvent participer aux différences de pression entre l'air intérieur et la porosité du sol ([6,7]).

Transfert diffusif

Lorsque deux volumes d'air ayant des concentrations en polluants différentes sont mitoyens, les polluants vont se déplacer de manière à tendre vers une concentration homogène entre les deux volumes d'air. Ce phénomène, décrit par la loi de Fick est la diffusion moléculaire. Les polluants gazeux du sol vont donc diffuser depuis le sol vers l'air atmosphérique ou vers l'air intérieur d'un bâtiment. Ce mode de transfert peut être important dans le cas où l'interface sol/bâtiment est très ouverte (par exemple : sol de cave en terre battue) mais se produit également à travers tout type de matériau. Ceci explique le fait que même en l'absence de différence de pression entre le volume d'air intérieur et le sol, les polluants gazeux du sol continuent à entrer dans le bâtiment.

Le lecteur pourra se référer au guide méthodologique FLUXOBAT qui présente les principes des transferts convectifs et diffusifs et les variables nécessaires à leur évaluation ([6]).



1.2 Rappel des objectifs et méthode

La méthodologie proposée dans ce projet a pour objectifs, d'une part, de caractériser in-situ des sols pollués, et d'autre part, d'évaluer leur impact sur la qualité de l'air des environnements intérieurs de bâtiments qui seraient construits sur ces parcelles.

Elle s'appuie sur des travaux précédents du projet ANR FLUXOBAT, ayant permis de tester sur la plateforme expérimentale SCERES du LHYGES, un appareillage destiné à la caractérisation des flux de polluant entrant dans un caisson dont les conditions d'utilisation (dépression, perméabilité de l'interface avec le sol) sont représentatives de celles rencontrées pour un bâtiment. Egalement, dans le cadre d'une étude ADEME (AGIR-QAI) ainsi que d'une thèse de doctorat (Thierno Diallo), des travaux précédents ont permis de développer de nouveaux modèles analytiques d'évaluation du transfert gazeux du sol vers les environnements intérieurs.

Ce projet a consisté à adapter l'outil expérimental et les méthodes associées dans un cadre in-situ afin d'en tester la pertinence pour apporter une complémentarité aux outils de gestion actuels. Son caractère innovant réside principalement sur le développement d'un prototype (caisson expérimental) qui vise à reproduire l'influence d'un bâtiment afin d'évaluer les transferts de polluants gazeux provenant du sol. L'utilisation de cet outil permet ainsi de caractériser une « source homogène équivalente » à partir des résultats obtenus. Cette « source homogène équivalente » est évaluée à partir d'une méthode inverse par l'utilisation d'un modèle semi-empirique de transfert de polluant gazeux spécifiquement adapté au prototype. La connaissance de la concentration de polluant à l'intérieur du caisson, du débit d'air extrait ainsi que du niveau de dépression régnant dans le caisson, permettent alors d'estimer la « source homogène équivalente » tout en fixant sa profondeur dans le sol. Cette « source homogène équivalente » est ensuite intégrée comme condition limite des modèles analytiques de prédiction des transferts de polluants gazeux des sols, eux-mêmes associés à un modèle de ventilation de bâtiment, afin de pouvoir apprécier l'impact de cette pollution sur les ambiances intérieures de bâtiment.

Ainsi, l'application de cette méthodologie comprend trois étapes présentées ci-dessous :

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

1.3 Caractérisation expérimentale de flux de polluants venant du sol

Le principe du caisson expérimental consiste à disposer d'un appareil circulaire, d'une surface d'emprise au sol d'environ 1,2 m de diamètre, d'une hauteur de 0,5 m et étanche à l'air, avec un ancrage au sol étanche et d'environ 0,1 m. L'interface avec le sol dispose d'une perméabilité à l'air calibrée afin d'assurer une perméabilité à l'air équivalente et représentative d'un bâtiment, et donc un transfert d'air et de polluant vers le volume du caisson. Par ailleurs, une extraction mécanique d'air est imposée et contrôlée afin de générer une dépression représentative de condition de bâtiment dans le volume. Des entrées d'air permettent également de contrôler le débit extrait et la dépression associée le cas échéant.

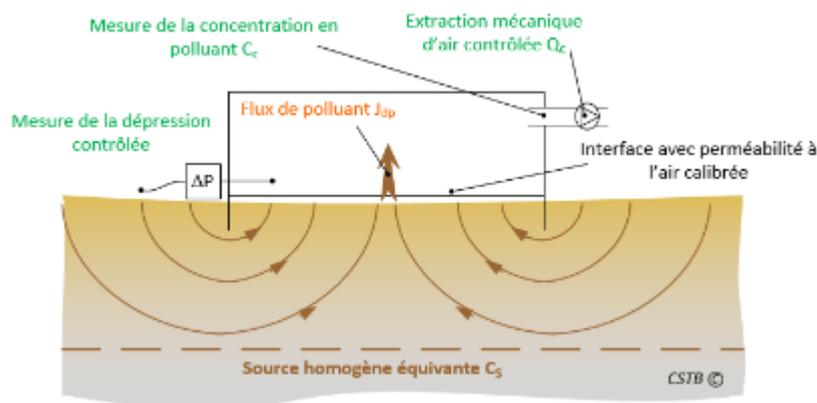


Figure 2 : Principe de fonctionnement du caisson expérimental

Les mesures de débit d'air extrait (Q_c), de concentration moyenne en polluant au point d'extraction (C_c), permettent ensuite d'obtenir une évaluation du flux de polluant entrant dans le caisson (J_{dp}), une fois les conditions expérimentales stationnaires obtenues, selon la formule suivante, et pour des conditions de dépression (ΔP) données et également mesurées :

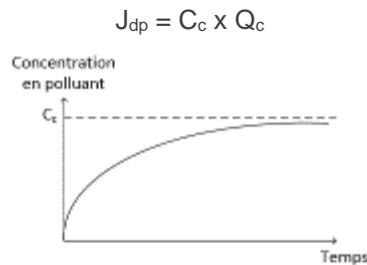


Figure 3 : Principe d'obtention de conditions stabilisées dans le caisson

1.4 Evaluation de « source homogène équivalente » de pollution

1.4.1 Présentation des modèles analytiques utilisés

Des modèles analytiques d'évaluation des débits d'air venant du sol et entrant dans un bâtiment ont été développés dans le cadre des travaux de thèse de T. Diallo [1, 5], en utilisant notamment une analogie entre les transferts thermiques et l'aérodynamique en milieu poreux. Dans ces mêmes travaux et sur cette base, des modèles semi-empiriques (MSE) ont été développés à partir d'expérimentations numériques afin de pouvoir en déduire des lois analytiques de transfert de polluants gazeux des sols vers les bâtiments et selon différentes typologies de soubassement.

Afin de pouvoir utiliser ces modèles dans le cadre du projet CAPQAI pour l'exploitation des résultats expérimentaux in-situ, une adaptation de ces modèles a été réalisée, rendu nécessaire notamment du fait de la géométrie du caisson expérimental ainsi que de la particularité associée à la perméabilité équivalente de l'interface. Néanmoins, la même approche et les mêmes principes ont été utilisés pour évaluer les débits d'air par analogie thermique et les flux de polluants entrant dans le caisson, issus d'une expérimentation numérique.

Ainsi les modèles analytiques résultants pour l'exploitation spécifique des résultats obtenus avec le caisson sont les suivants :

Débit d'air entrant dans le caisson :

$$Q_{dp} = \frac{2 \times k_{sol} \times \Delta P}{\mu} \left[\frac{L_{dalle}}{2} - \beta \times \ln \left(\frac{1 + \alpha \times (L_{dalle} + E_j)}{1 + \alpha \times E_j} \right) \right]$$

avec

$$\beta = \frac{1}{2\alpha}$$

et

$$\alpha = \frac{\pi \times k_{dalle} \times k_{grav}}{2(2 \times k_{dalle} \times k_{grav} \times E_e + k_{dalle} \times k_{sol} \times E_{grav} + k_{dalle} \times k_{grav} \times E_{grav} + k_{sol} \times k_{grav} \times E_{dalle})}$$

Où Q_{dp} est le débit d'air élémentaire c'est-à-dire par mètre linéaire de liaison ($m^3/s.m$), k_{sol} est la perméabilité à l'air du sol (m^2), k_{dalle} est la perméabilité à l'air de la dalle (m^2), k_{grav} est la perméabilité à l'air du gravier (m^2) le cas échéant, E_e est la profondeur de la jupe enfoncée dans le sol (m), E_j est l'épaisseur de la jupe (m), E_{grav} est la profondeur du gravier (m), E_{dalle} est l'épaisseur de la dalle (m), L_{dalle} est la longueur caractéristique de la dalle (m), ΔP est la différence de pression entre l'intérieur du caisson et l'extérieur (Pa) et μ est la viscosité dynamique de l'air (Pa.s).

Flux de polluant entrant dans le caisson :

$$J_{dp} = \frac{C_{dp}}{Q_{dp}}$$



Concentration moyenne dans le caisson :

$$C_{dp} = C_s \left(A \times B^{1/Pe} \times Pe^C \right) \left(0,479 + 0,481 \times \frac{H_0}{H} \right)$$

Avec :

$$Pe = \left(\frac{Q_{dp}}{A_{dp}} \right) \left(\frac{e_{dalle}}{D_{dalle}} + \frac{H_{sol}}{D_{sol}} + \frac{e_{air}}{D_{air}} \right)$$

Avec C_{dp} : la concentration à l'intérieur du caisson ; C_s : la concentration à la source ; $A=7,068 \times 10^{-4}$; $B=3,37 \times 10^{12}$; $C=-0,251$; A_{dp} : la surface de l'interface ; D_{dalle} : le coefficient de diffusion de la dalle ; e_{dalle} : l'épaisseur de la dalle ; H_{sol} : la profondeur de la source ; H_0 : la profondeur de référence ; D_{sol} : le coefficient de diffusion du sol ; e_{air} : l'épaisseur de la lame d'air ; D_{air} : le coefficient de diffusion de l'air.

Il est à noter que ces lois analytiques sont issues de l'interpolation de résultats d'une « expérimentation numérique » réalisée à l'aide d'un modèle de mécanique des fluides, sur la configuration du caisson, et de façon analogue aux travaux réalisés dans la thèse de T. Diallo [1,5].

1.4.2 Estimation de la « source homogène équivalente »

Ainsi, à partir de la connaissance expérimentale du flux de polluant et de la concentration moyenne dans le caisson pour les conditions stationnaires établies, telles que présentées sur le principe dans le §1.3, et avec un débit de renouvellement d'air nul dans le caisson, il est possible de déterminer la concentration dans le sol que l'on appellera « source homogène équivalente » de pollution pour une certaine profondeur de H_{sol} donné, par utilisation inverse de la formule précédente, de la manière suivante :

$$C_s = \frac{C_{dp}}{\left(A \times B^{1/Pe} \times Pe^C \right) \left(0,479 + 0,481 \times \frac{H_0}{H_{sol}} \right)}$$

Cette « source homogène équivalente » à une profondeur donnée H_{sol} , correspond ainsi à des conditions virtuelles dans le terrain considéré, dont résulterait le même débit de polluant gazeux venant du sol dans le caisson expérimental.

1.4.3 Estimation de la perméabilité à l'air équivalente du sol

Par ailleurs, l'utilisation de l'équation ci-dessus relative au calcul du débit d'air entrant dans le caisson, associé à la connaissance expérimentale de ce débit d'air ainsi que de la dépression régnante dans le caisson, permet de calculer une perméabilité à l'air équivalente du sol compris dans la zone convective de l'écoulement, autrement dit traversé par le flux d'air entrant dans le caisson. Compte tenu de la taille du caisson, la zone convective pour laquelle la perméabilité est ainsi estimée correspond aux 60 premiers cm de sols.

1.5 Estimation de la concentration intérieure dans un bâtiment

Une fois la « source homogène équivalente » déterminée, cette valeur est ensuite utilisée comme donnée d'entrée et condition limite de modèles analytiques de transferts des polluants gazeux du sol vers le bâtiment.

A l'heure actuelle, les modèles analytiques sont généralement utilisés dans le cadre des prestations se référant à la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués (MTES, 2017), l'environnement intérieur est modélisé par un simple nœud considérant un renouvellement d'air constant et une dépression intérieure fixe. Dans le cadre du projet CAPQAI, les modèles analytiques Semi-EMpiriques (SEM) développés dans la thèse de Thierno Diallo ([1] [5]) ont été utilisés et couplés à un modèle de simulation numérique pour l'évaluation de la ventilation et de la qualité d'air intérieur des bâtiments, permettant ainsi de tenir compte de caractéristiques spécifiques de bâtiment influant les conditions environnementales intérieures de renouvellement d'air et de pression.

1.5.1 Modèles analytiques

Dans le cadre de cette étude nous avons utilisé les modèles analytiques Semi-EMpiriques (SEM) développés dans la thèse de Thierno Diallo ([1] [5]). Ces modèles ont été confrontés à des résultats



expérimentaux in-situ ainsi qu'aux résultats d'autres modèles utilisés classiquement dans le domaine des sols pollués. Ce type d'exercice, toujours complexe, a été réalisé dans le cadre du projet CAPQAI sur des cas expérimentaux ayant pu être identifiés. Il ne permet malheureusement pas de conclure systématiquement à la meilleure appréciation réalisée par les différents modèles car elle varie selon les cas. Ainsi, les nouveaux modèles de transfert développés par Diallo donnent des résultats comparables avec les autres modèles usuellement utilisés par les bureaux d'études. L'avantage de ces nouveaux modèles de transferts par rapport à ceux usuellement utilisés est la prise en compte bi-dimensionnelle qui prétend mieux modéliser les écoulements proches du soubassement, en fonction de la typologie de soubassement du bâtiment (écoulement à travers une fissure périphérique, une fissure apparente et un milieu poreux.).

Les trois familles de typologies de soubassement pouvant être prises en compte par ces modèles sont schématisées ci-dessous :

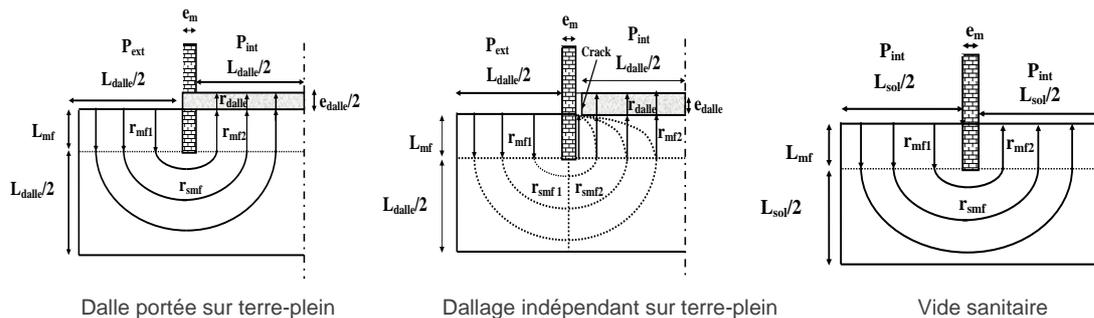


Figure 4 : Schématisation des typologies de soubassements prise en compte dans les modèles SEM ([5])

Il existe également des variantes de ces modèles pouvant intégrer des murs enterrés le cas échéant.

1.5.2 Modèle de ventilation du bâtiment

Le modèle utilisé (MATHIS-QAI) est un modèle de ventilation instationnaire du bâtiment développé au CSTB [25]. Ce modèle permet d'évaluer l'exposition aux concentrations en polluants dans l'air intérieur.

Le modèle est basé sur une méthode de résolution nodale, ce qui signifie que les différentes zones du bâtiment sont représentées par un seul nœud pour les différentes variables d'état (température, pression).

A chaque pas de temps, le principe de résolution est de poser le bilan massique entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment ainsi que dans chaque pièce :

$$\sum \dot{m} = 0$$

Où \dot{m} est un débit massique entrant ou sortant du domaine considéré ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)

Des lois de puissance sont utilisées classiquement pour exprimer le débit d'air en fonction de la différence de pression de part et d'autre d'un composant du bâtiment. Ces composants peuvent être des organes de ventilation (entrées d'air, bouches d'extraction ou d'insufflation, mécanisées ou naturelles), ainsi que des éléments de perméabilité à l'air des bâtiments (fuites). En outre, les champs de pression hydrostatique intérieure et extérieure dépendent de la pression au niveau du sol, des températures intérieures et extérieures, de la force du vent et la direction du vent.

Connaissant à chaque pas de temps, les conditions météorologiques et la température intérieure et faisant l'hypothèse d'une pression extérieure de référence au sol égale à zéro, l'équation précédente peut s'écrire comme une équation dépendant uniquement de la pression intérieure au sol au niveau de la zone considérée :

$$f(P_0^{int}) = 0$$

Où P_0^{int} (Pa) est le niveau de pression intérieure au sol.

Le logiciel calcule ainsi les flux entrants et sortants des pièces et vis-à-vis de l'extérieur à chaque pas de temps (variable, minimum 3 min) sur la période à étudier (pouvant aller jusqu'à plusieurs années) ainsi que le niveau de pression différentielle du bâtiment, notamment au niveau du plancher bas.

Comme il l'a été précisé au §1.4, les modèles SEM sont notamment paramétrés en fonction du différentiel de pression existant entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Ainsi l'association des

modèles SEM au code numérique MATHIS-QAI permet à chaque pas de temps de définir un flux de polluant gazeux des sols entrant dans le bâtiment considéré. Il est alors possible de calculer à chaque pas de temps la concentration intérieure résultante à l'aide de code numérique MATHIS-QAI, et en fonction de l'ensemble des paramètres.

Le schéma de la figure ci-dessous illustre la représentation de l'association des modèles analytiques SEM avec un modèle numérique de calcul de la ventilation d'un bâtiment.

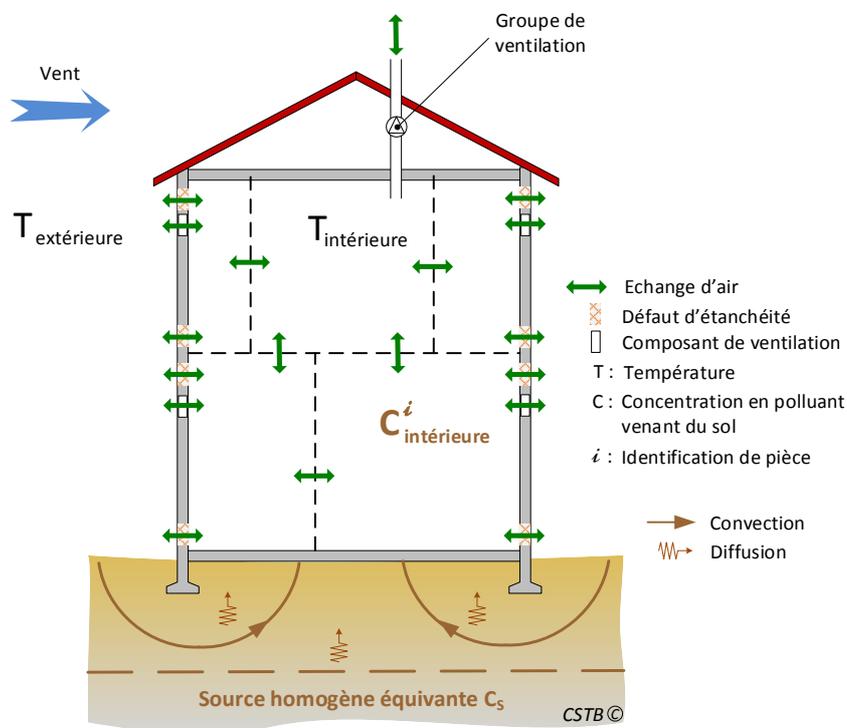


Figure 5 : Schématisation de l'association des modèles SEM à un modèle numérique d'évaluation de la ventilation des bâtiments.

1.6 Résultats de la méthodologie

Ainsi, pour une situation de pollution gazeuse des sols donnée, le développement des trois phases ci-dessus de la méthodologie permet, à partir de la caractérisation d'une source homogène équivalente à une profondeur donnée, d'évaluer les concentrations résultantes dans un bâtiment qui serait construit sur ce terrain, en tenant compte des caractéristiques architecturale et des systèmes de ventilation de ce dernier.

2 Mise en œuvre de la méthodologie sur un site réel

Le développement des principes présentés ci-dessus a été réalisé dans le cadre du projet CAPQAI à partir d'une condition réelle de sol pollué.

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

2.1 Caractérisation expérimentale

Afin de réaliser la caractérisation expérimentale de flux de polluants venant du sol, le déploiement du dispositif développé a été réalisé sur un ancien site industriel pour lequel les pollutions, les paramètres et les variables associées aux transferts des polluants gazeux ont par ailleurs été caractérisés.

2.1.1 Description du site

Il s'agit d'un site caractérisé par une pollution par des hydrocarbures pétroliers (mélanges d'essences et de gazole). L'origine des pollutions (zone d'infiltration) est multiple sur le site et le type de pollution

(ou le type de mélanges d'hydrocarbures) variable. Dans les gaz du sol, les hydrocarbures en présence sont essentiellement aliphatiques. Les terrains dans la Zone Non Saturée (ZNS) présentent une alternance de limons et sables assez classiques des terrains alluvionnaires. Les lithologies rencontrées sur le site sont des remblais hétérogènes jusqu'à 1,3 m de profondeur, une alternance de sable graveleux et de limons jusqu'à 9m de profondeur, des limons et/ou sables dans la zone de battement de la nappe entre 9 et 11 m de prof et une grave sableuse sous-jacente. Le niveau de nappe sur le site (entre 8 et 11 m de profondeur) est dépendant du niveau de la rivière à proximité.

En complément des diagnostics environnementaux disponibles sur ce site, dans le cadre du projet CAPQAI de nombreuses investigations de caractérisation approfondie de sols, des pollutions et des conditions de transfert ont été conduites dans un premier temps afin de sélectionner les zones sur lesquelles les expérimentations avec le caisson allaient être réalisées et dans un second temps afin de disposer des éléments nécessaires à l'interprétation des investigations.

Les essais conduits dans le secteur nord sont présentés dans ce livrable. Dans ce secteur, une zone enherbée a fait l'objet de la mise en œuvre de multiples piezairs à différentes profondeurs ayant permis la mesure des concentrations dans les gaz du sol à différentes périodes et la mesure de la perméabilité au gaz des terrains. Le panache de pollution gazeuse est issu de la volatilisation i) des pollutions contenues dans la zone de battement de la nappe (entre 8 et 11 mètres de profondeur) et ii) des pollutions retenues dans les horizons moins perméables de la zone non saturée.

La figure ci-dessous montre une vue du plan du site et de la zone étudiée (nord).

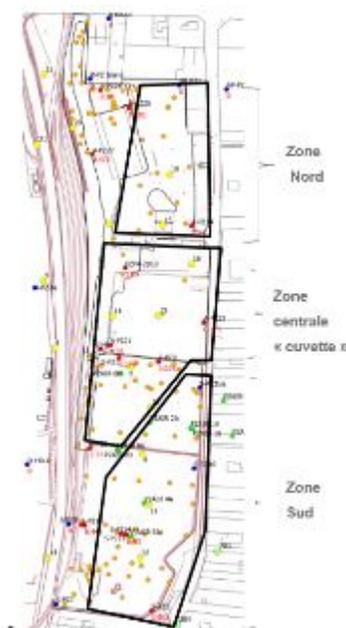


Figure 6 : Plan du site et de la zone étudiée (zone nord).

2.1.2 Moyens mis en oeuvre

2.1.2.1 Métrologie de terrain

Pour accompagner et valider la réalisation des expérimentations, un ensemble de mesures a été réalisé sur le terrain considéré.



Figure 7 : Vues de la zone instrumentée

Une pré caractérisation du terrain de la zone « nord » a été conduite à l'aide de piézaires installés à environ 1 m de profondeur, de mesures des concentrations en hydrocarbures dans les gaz du sol au PID et avec l'analyseur multigaz (O_2/CO_2), de prélèvements et analyses quantitatives sur une sélection de piézaires. Ces mesures ont permis d'évaluer que cette zone présentait une hétérogénéité des concentrations à 1 m de profondeur associée à la présence d'une source latérale d'hydrocarbures dans les sols en complément de la source présente dans la zone de battement de nappe. Elle se caractérise par ailleurs par un environnement bitumé sur son pourtour.

La zone expérimentale a ensuite été équipée d'ouvrages permettant les mesures de perméabilité in situ, le suivi durant les expérimentations des concentrations dans les gaz du sol et des conditions environnementales pouvant influencer les concentrations et les débits massiques vers l'atmosphère. Plusieurs piézaires ont été installés afin de pouvoir caractériser les concentrations dans les gaz du sol à 0,5 - 1 - 3 - 5 et 7 m de profondeur, ainsi qu'un ouvrage avec capteur permettant le suivi du niveau de la nappe. Enfin une station météorologique a été installée proche de la zone considérée.

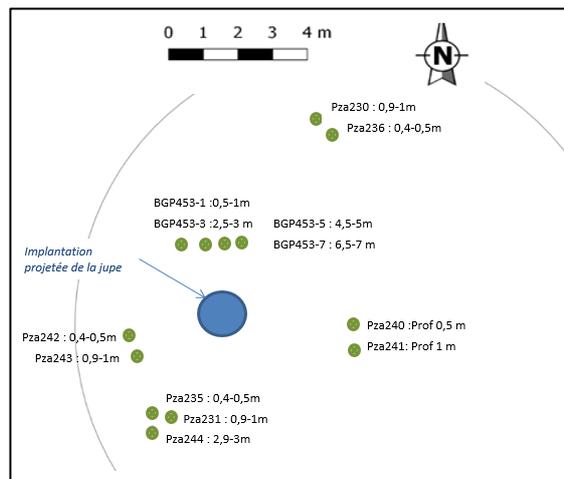


Figure 8 : Schématisation de la zone instrumentée.

Des modélisations numériques ont également permis de compléter la caractérisation des sols et des transferts de polluants.

2.1.2.2 Caisson expérimental

Le caisson a été conçu pour reproduire de façon similaire des conditions de pression et de renouvellement d'air d'un bâtiment. Il est constitué de 3 parties : une partie dans le sol (jupe), un corps principal incluant l'interface à perméabilité calibrée et la partie latérale (cloche) et un couvercle.

Le renouvellement d'air et la mise en dépression du caisson expérimental est possible grâce à l'association d'une entrée d'air modulable intégrée au couvercle et d'une pompe d'extraction d'air à vitesse variable pouvant générer des dépressions allant de 1 à 50 Pa dans le caisson expérimental.

La métrologie du caisson est constituée d'appareils permettant la mesure du débit extrait, de la dépression générée à l'intérieur du caisson et de la température et humidité intérieure.



La figure ci-dessous présente les différentes étapes de l'installation sur site.



Figure 9 : Présentation des étapes d'installation du caisson sur site.

Concernant les mesures de polluants, les concentrations en COV ont été mesurées d'une part à l'aide d'un analyseur de type PID pour le suivi en continu des concentrations sous l'interface, dans le caisson et à la sortie du caisson et d'autre part avec des prélèvements dynamiques sur charbon actifs permettant la quantification des différentes fractions d'hydrocarbures présentes à ces différents endroits.

2.1.3 Résultats expérimentaux

Le Tableau 1 résume les conditions expérimentales et les mesures de deux essais (essai 3 et essai 10) réalisés dans le cadre du projet qui ont été exploités.

Les concentrations ci-dessous représentent la somme des fractions d'hydrocarbures (C5 à C16). Sont présentées les concentrations correspondant aux paliers, estimées à partir des courbes d'évolution mesurées.

La concentration C_{dp} de l'équation du modèle inverse correspond à la concentration « en sortie de caisson » du tableau. On notera que la concentration désignée « dans le caisson » a été obtenue par une ligne de prélèvement située à proximité de l'interface. Il a été montré au cours du projet que cette concentration diffère de manière notable de la concentration « en sortie de caisson » ; ce qui traduit une non homogénéité de la concentration en polluant dans le caisson. Ainsi, c'est la concentration en sortie de caisson qui est représentative d'une concentration moyenne. En ce qui concerne l'essai 10 pour lequel la concentration en sortie de caisson n'a pas pu être mesurée, une évaluation à partir de la concentration « dans le caisson » a été effectuée en multipliant cette dernière par 0,54 (coefficient calculé à partir des résultats d'un autre essai) ; ce qui introduit une imprécision dans le résultat exploité. La connaissance de la dépression entre l'intérieur et l'extérieur permet de déterminer le débit Q_{dp} à l'aide du modèle développé et le taux de renouvellement d'air du caisson est calculé grâce au débit extrait du caisson pendant l'essai.

Tableau 1 : Conditions expérimentales et mesures des essais n°3 et n°10.

Essai	Concentrations sous l'interface (mg/m ³)	Concentration en sortie de caisson (mg/m ³)	Concentration dans le caisson (mg/m ³)	Dépression entre l'intérieur du caisson et l'extérieur (Pa)	Débit extrait du caisson (m ³ /h)
3	12,9	<0,47	Non mesurée	10,6	1,57
10	12,9	Non mesurée*	3,2	21,0	0,55

* évaluée à 1,14. voir explication dans le texte

La figure ci-dessous présente pour ces deux essais l'évolution des concentrations en polluant dans le caisson pour l'obtention des conditions stationnaires.



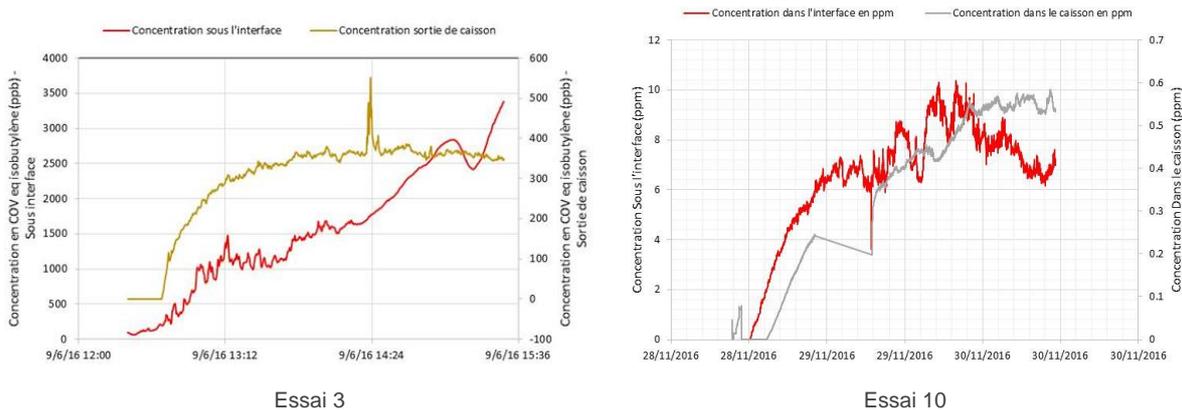


Figure 10 : Evolution des concentrations en polluant dans le caisson et sous l'interface.

2.2 Evaluation de « source homogène équivalente »

A partir de ces résultats et comme expliqué au § 1.4.2, il est possible, par utilisation par méthode inverse du modèle analytique développé de déduire des couples (concentration de la « source homogène équivalente », profondeur). Ces couples ont ainsi été évalués pour différentes profondeurs et les concentrations en gaz du sol résultantes comparées aux mesures de terrains réalisées au même moment que les expérimentations.

La **Figure 11** présente les profils de concentrations mesurées et modélisées sous le caisson pour les deux essais. On notera que les valeurs obtenues ont été présentées pour des profondeurs allant de 0,1 à 5 m bien que le modèle semi-empirique ait été élaboré pour des profondeurs supérieures à 3 m. Il semblerait cependant que le modèle permette d'obtenir des résultats cohérents pour de plus faibles profondeurs et que son utilisation peut très certainement être étendue pour des profondeurs à partir de 1 m.

Le modèle n'est pas capable d'évaluer la position de la source mais on notera cependant que pour une profondeur de 3 m, le modèle évalue bien la concentration mesurée pour un coefficient de diffusion dans le sol autour de 10^{-9} m²/s pour l'essai 3 et entre 10^{-8} et 10^{-7} m²/s pour l'essai 10. On note ainsi une forte dépendance du résultat de modélisation à la valeur du coefficient de diffusion.

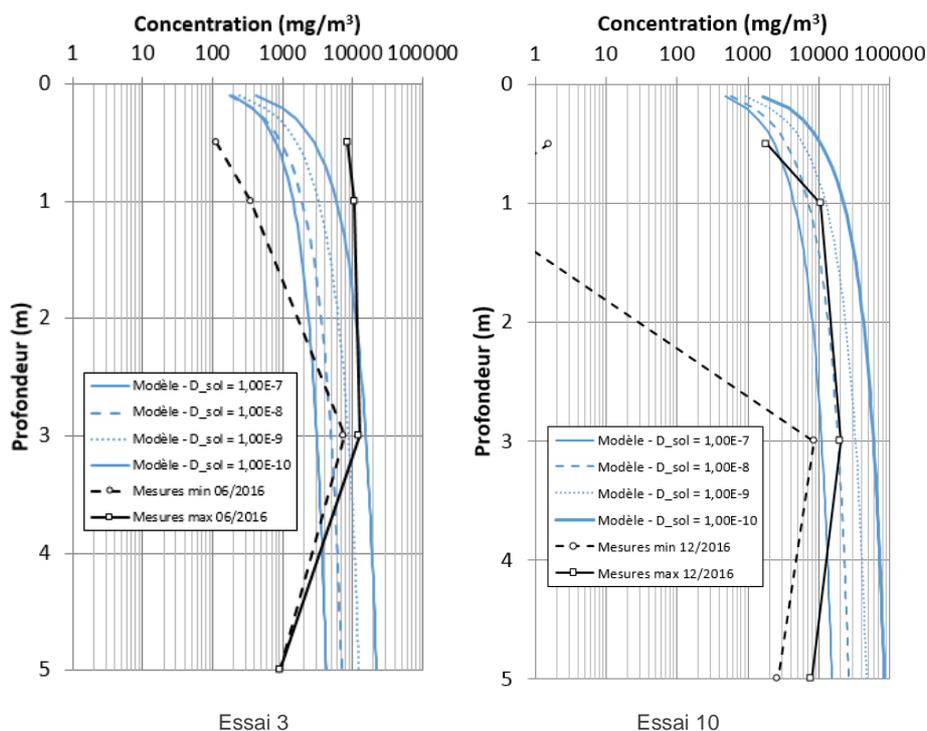


Figure 11 : Profils de concentrations mesurées (en noir) et modélisées sous le caisson (couleur).



L'adaptation des modèles de Diallo ([1,5]) a permis de développer un modèle dédié à la géométrie du caisson du projet CAPQAI. La partie analytique d'évaluation des débits d'air de ce modèle a été tout d'abord validée par comparaison avec des expérimentations effectuées lors de projets de recherche (IMPACT-CO2 [8] et FLUXOBAT [6]).

Il a été également montré que l'utilisation du modèle de débit d'air à partir de données expérimentales permet la détermination d'une perméabilité à l'air équivalente du sol sous le caisson et dans la zone de convection, les résultats des mesures étant comparables à ceux obtenus par la mesure de perméabilité in situ sur les piezairs par leur mise en dépression entre 1 et 200 Pa.

Enfin, le modèle diffusivo-convectif complet s'est montré fiable pour évaluer un couple (concentration-profondeur) cohérent correspondant à une « source homogène équivalente » par comparaison avec les gammes de concentrations mesurées dans les gaz du sol dans les conditions des essais. . Comme tout modèle, on insistera ici sur la nécessité de la connaissance des paramètres d'entrée comme ceux obtenus lors de la phase expérimentale (dépression, taux de renouvellement d'air et palier stable de la concentration extraite du caisson) et les propriétés du sol (perméabilité à l'air et coefficient de diffusion du polluant).

Par ailleurs, il faut mentionner que ce type de caractérisation des transferts ne peut être réalisé sans une bonne connaissance préalable des terrains et des pollutions. En particulier, l'emploi de cette méthodologie ne remplace pas les mesures de concentrations dans les gaz du sol qui permettent entre autres d'interpréter de manière cohérente les essais, mais vient en complémentarité, afin de conforter d'une part ces résultats et d'autre part de conduire des évaluations d'impact sur des bâtiments futurs.

Enfin, il convient de garder en mémoire que les couples (concentration-profondeur) établis avec la méthodologie développée sont représentatifs des conditions environnementales et des aménagements existants, les variations des conditions de transfert dans les sols et le recouvrement futur des sols avec des revêtements de sols ou bâtiment pourront conduire à modifier ces sources homogènes équivalentes, notamment si la profondeur associée ne se situe pas hors de la zone convective générée dans le sol par ces aménagements.

2.3 Evaluation de la perméabilité à l'air équivalente du sol

Il a été également montré (§1.4.3) que l'utilisation du modèle de débit d'air à partir de données expérimentales permet la détermination d'une perméabilité à l'air équivalente du sol sous le caisson et dans la zone de convection. La figure ci-dessous présente une comparaison entre les valeurs de perméabilités à l'air équivalentes calculées et les valeurs mesurées à différentes profondeurs autour du caisson par essais de pompage décrits dans Traverse et al. 2013 [6]. On voit ainsi que la méthode permet d'obtenir un ordre de grandeur satisfaisant pour ce paramètre.

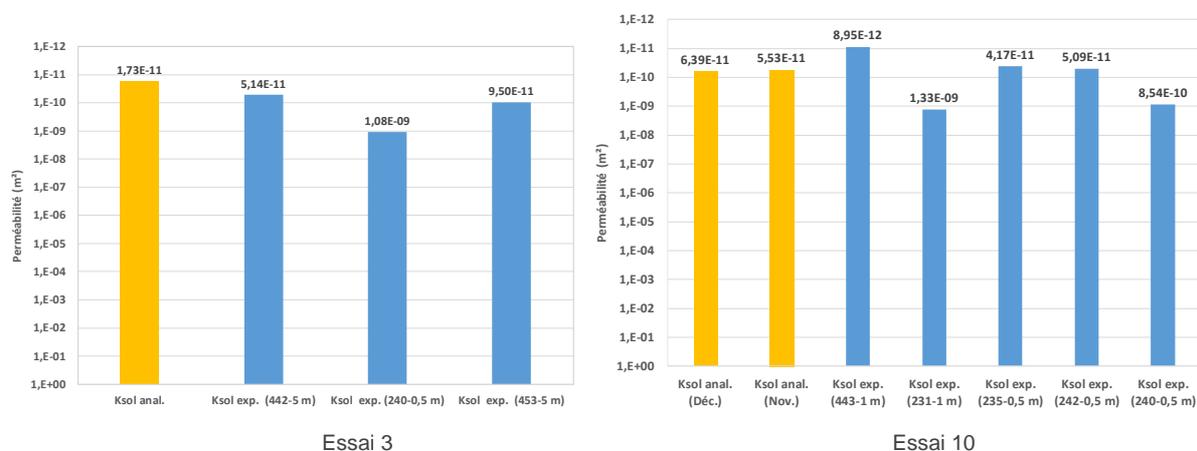


Figure 12 : comparaison entre les valeurs de perméabilités à l'air équivalentes calculées (orange) et les valeurs mesurées (bleu).

2.4 Estimation de la concentration intérieure dans un bâtiment

A partir de ces développements et à titre illustratif, une étude de sensibilité a été menée afin d'évaluer le transfert de la pollution gazeuse du sol du site investigué en fonction de certaines caractéristiques du bâtiment (typologie du soubassement, perméabilité à l'air de l'enveloppe du bâtiment, système de ventilation). Afin d'étudier l'impact de paramètres caractéristiques du bâtiment sur les concentrations intérieures.

2.4.1 Présentation de l'étude de sensibilité

Pour cela, nous avons modélisé une maison individuelle de référence sur deux niveaux décrite ci-dessous.

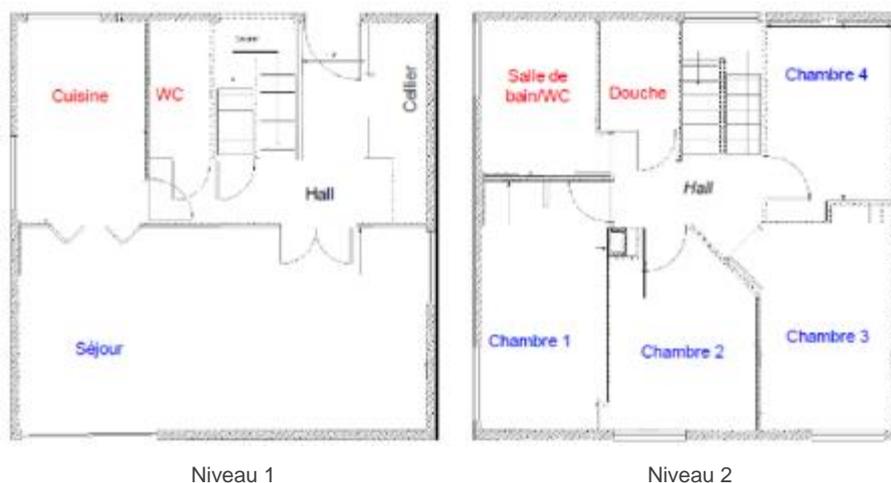


Figure 13 : Plan des niveaux de la maison de référence

Tableau 2 : Paramètres commun relatif au cas de référence.

Caractéristiques du bâtiment	
Surface au sol (m ²)	81
Hauteur du bâtiment (m)	5
Volume du bâtiment (m ³)	405
Longueur façades Nord, Est, Sud et Ouest (m)	9
Surface déperditives hors plancher bas (m ²)	261
Epaisseur de la dalle (m)	0,2
Perméabilité à l'air de la dalle (m ²)	1E-13
Coefficient de diffusion da la dalle (m ² .s ⁻¹)	1E-08
Epaisseur du lit de gravier (m)	0,5
Perméabilité à l'air du lit de gravier (m ²)	1E-09
Epaisseur du mur de fondation (m)	0,295
Profondeur du mur de fondation (m)	0,5
Conditions aux limites du bâtiment	
Température intérieure (°C)	si Text≤19°C, 19°C sinon Tint=Text

A partir des expérimentations réalisées et à titre illustratif, les caractéristiques de sol retenues pour ces calculs sont les suivantes.

Tableau 3 : Caractéristiques du sol modélisé.

Caractéristiques du sol modélisé	
Perméabilité à l'air du sol (m ²)	6E-10
Coefficient de diffusion dans le sol (m ² .s ⁻¹)	4,4E-06
Profondeur de la « source homogène équivalente » (m)	5

Concentration de la « source homogène équivalente » ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	2,7E+07
---	---------

A partir de la description commune ci-dessus, nous avons réalisé une étude de sensibilité sur la variabilité des paramètres suivants du bâtiment :

(i) Typologie du soubassement

D'après une enquête menée par l'AQC en 1995 sur des opérations d'habitations individuelles, les typologies de soubassement les plus usuellement rencontrées en France sont des dallages sur terre-plein.

Ainsi une étude de sensibilité a été réalisée sur ces deux typologies :

- Dallage Indépendant (DI) avec fissure périphérique d'une épaisseur de 1 mm.
- Dalle portée sur terre-plein (DP)

(ii) Perméabilité à l'air du bâtiment

L'indicateur de perméabilité à l'air de l'enveloppe du bâtiment Q_{4Pa} correspond à un débit de fuite sous une dépressurisation de 4 Pascal rapporté à la surface déperditive du bâtiment. Plus cet indicateur est grand, plus le bâtiment est considéré comme perméable à l'air. Une étude de sensibilité a été menée sur la perméabilité à l'air du bâtiment avec des valeurs représentatives respectivement d'une construction neuve et d'un bâtiment existant :

- $Q_{4Pa} = 0,6 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$
- $Q_{4Pa} = 1,6 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$

(iii) Système de ventilation

Il a été décidé de réaliser une étude de sensibilité sur trois systèmes de ventilation mécanique contrôlé (VMC) :

- un système VMC par extraction (VMC_EXT)
- un système VMC Double-Flux équilibré (VMC_DF_EQ)
- un système VMC Double-Flux déséquilibré en soufflage (VMC_DF_SURP)

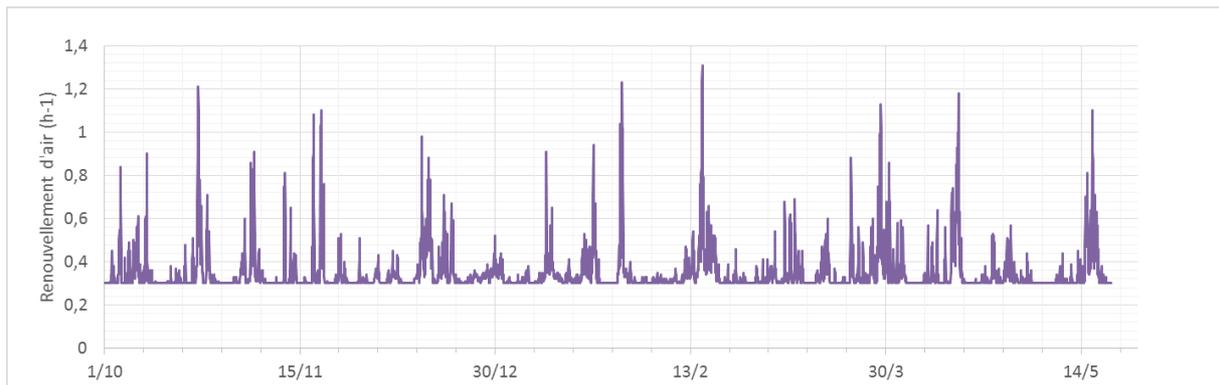
En effet, les deux premiers systèmes sont classiquement utilisés dans les logements récents et le troisième peut être utilisé comme solution de protection car, a priori, il minimise la dépression du bâtiment et donc l'entrée de polluant gazeux du sol par convection. Le dimensionnement de ces trois systèmes de ventilation est basé sur la réglementation en vigueur dans l'habitat, à savoir l'arrêté du 24 mars 1982, modifié du 15 novembre 1983.

2.4.2 Résultats

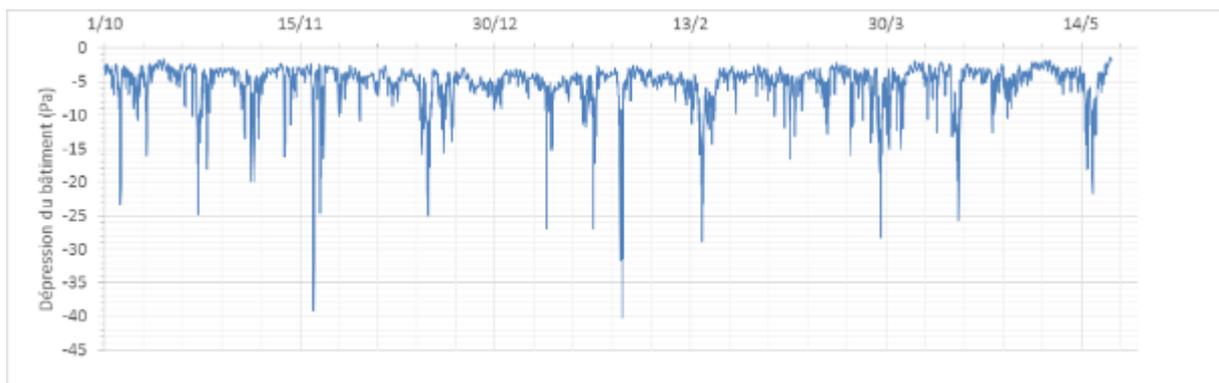
Les calculs ont été menés sur une année pour les différents scénarios et en prenant des conditions météorologiques de la France métropolitaine sur une année. Les résultats présentés dans cette partie ont principalement un intérêt comparatif entre eux.

A titre illustratif, on présente ci-dessous les évolutions temporelles obtenues pour ce qui concerne les évolutions de renouvellement d'air, de niveaux de dépression du bâtiment, de flux entrant de polluant et de concentration intérieure résultante, dans le cas de l'utilisation de la VMC par extraction mécanique.

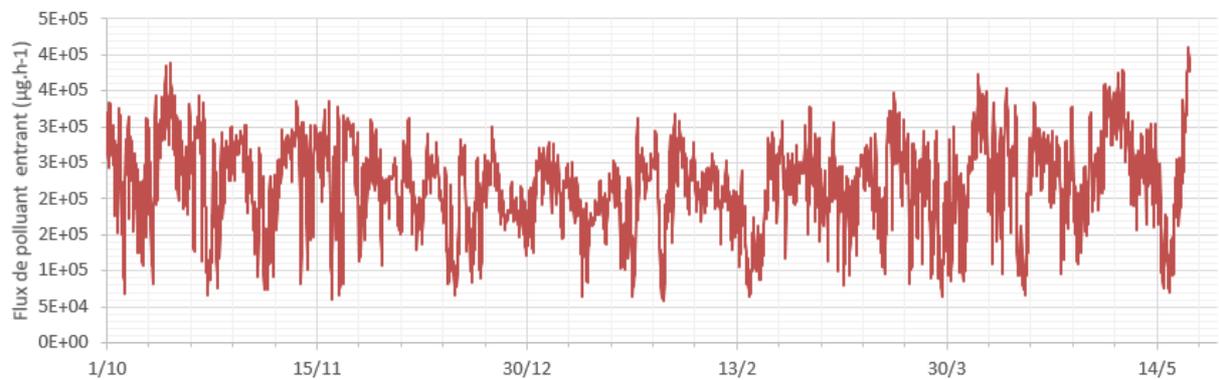




Renouvellement d'air du bâtiment.



Dépression du bâtiment.



Flux entrant de polluant dans le bâtiment.



Concentration intérieure dans le bâtiment

Figure 14 : Exemples d'évolution temporelle dans le cas de la VMC par extraction.



Néanmoins et afin d'analyser plus facilement les variations de résultats, notamment au regard de valeurs d'expositions moyennes ou extrêmes, les concentrations moyenne annuelle, minimum et maximum sont répertoriées pour chaque cas dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Concentrations moyenne annuelle, minimum et maximum des différentes configurations de bâtiment modélisées.

Configurations du bâtiment			Concentration de polluant ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)		
Typologie de soubassement	Q_4 ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)	Systèmes de ventilation	Moyenne annuelle	Minimum	Maximum
DI	0,6	VMC_EXT	2468	235	3633
DP			664	77	1010
DI	1,6		1980	82	3540
DP			383	69	467
DI	0,6	VMC_DF_EQ	2433	205	3265
DP			436	66	672
DI	1,6		1774	89	2609
DP			292	65	405
DI	0,6	VMC_DF_SURP	2155	235	2633
DP			335	64	574
DI	1,6		1615	88	2240
DP			254	63	351

2.4.3 Analyse

Les calculs réalisés à travers cette étude de sensibilité permettent d'illustrer l'intérêt du développement de cette méthodologie, à savoir d'étudier l'impact de l'identification d'une pollution résiduelle dans les sols sur des bâtiments construits sur ces derniers en fonction notamment des caractéristiques typologiques de ces bâtiments.

Les résultats présentés lors de cette étude de sensibilité montrent des tendances qualitativement cohérentes avec les caractéristiques du bâtiment. On observe ainsi des valeurs de facteurs d'atténuation entre 10^{-4} et 10^{-5} par rapport à la concentration dans le sol donnée à 5 m de profondeur. A noter cependant que ce résultat est obtenu sur la base des travaux de caractérisation présenté dans ce document et des calculs numériques réalisés. Il ne peut pas être généralisé. On pourra se reporter aux travaux de FLUXOBAT [6] concernant l'analyse qui y est présentée concernant les facteurs d'atténuation.

Pour les caractéristiques du bâtiment étudiées, il peut être observé une différence d'un ordre de grandeur en termes de concentration intérieure de polluants en fonction des scénarios. Ce résultat, illustratif sur un cas donné de bâtiment, montre néanmoins l'intérêt du développement de cette méthode ainsi que l'impact non négligeable de paramètres déterminants du bâtiment sur les concentrations intérieures en polluants résultantes d'une pollution résiduelle des sols.

A ces variations, il convient d'ajouter celles associées aux variations temporelles et spatiales des pollutions dans les terrains et des conditions de leur transferts dans la zone non saturée qui peuvent conduire également à des écarts significatifs sur les concentrations dans l'air intérieur ([26]).



3 Analyse de la méthodologie

Cette partie s'attache à présenter le cadre d'utilisation, les limites et les potentialités de la nouvelle méthodologie, en ce qui concerne les typologies de pollutions adéquates des sols, les conditions d'expérimentation, d'interprétation et d'utilisation des résultats.

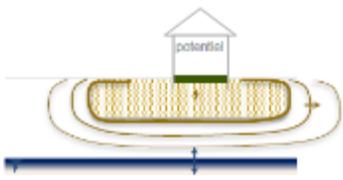
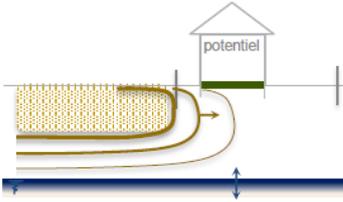
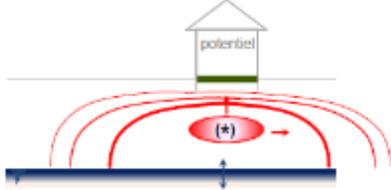
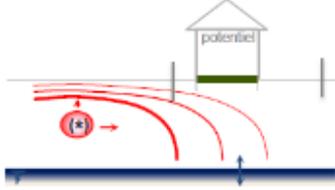
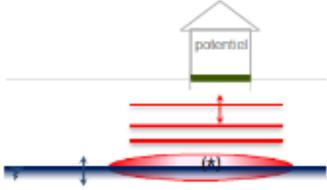
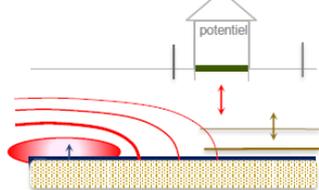
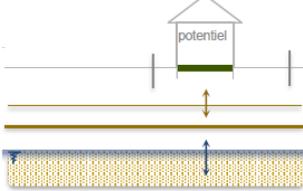
3.1 Typologie de pollution des sols au regard du bâtiment

On peut distinguer trois situations pour la construction de futurs bâtiments au regard de la pollution du sol :

- (1) Pollution sous le futur bâtiment
- (2) Pollution en dehors de l'emprise du futur bâtiment, voire du site
- (3) Pollution dissoute dans la nappe

Pour les deux premières catégories, on peut considérer trois situations de pollution : pollution résiduelle adsorbée dans la Zone Non Saturée (ZNS), pollution par phase organique dans la ZNS, et pollution par phase organique dans la zone de battement de nappe. Le tableau présenté ci-dessous résume l'ensemble des situations que l'on peut rencontrer. Les situations réelles peuvent aussi correspondre à un mixte de ces différents schémas conceptuels.

Tableau 5 : Typologies de pollution des sols au regard d'un bâtiment.

1 - Pollution sous le futur bâtiment	2 - Pollution en dehors de l'emprise du futur bâtiment, voire du site
<p>1.a - pollution résiduelle adsorbée dans la ZNS</p> 	<p>2.a - pollution résiduelle adsorbée dans la ZNS</p> 
<p>1.b - pollution par phase organique dans la ZNS</p> 	<p>2.b - pollution par phase organique dans la ZNS</p> 
<p>1.c - Pollution par phase organique dans la zone de battement de nappe</p> 	<p>2.c - Pollution par phase organique dans la zone de battement de nappe</p> 
<p>3 - Pollution dissoute dans la nappe (source lointaine avec impact uniquement dissous à cette distance)</p> 	

(*) : Le traitement de la source de pollution sous forme de phase organique doit être envisagé. Il doit faire l'objet des études techniques et économiques décrites dans MTES, 2017 [2]

Au vu des hypothèses de développement du modèle semi-empirique adapté pour le caisson afin d'évaluer une «source homogène équivalente» à une certaine profondeur, il apparaît que cette méthodologie est plus adaptée à certaines typologies de pollution des sols plutôt que d'autres. En effet, le modèle semi-empirique se base sur une source au droit du bâtiment, en limite ou au-dessous de la zone convective du caisson, entre 1 et 12 m. Ainsi, cette méthodologie s'avère particulièrement pertinente dans les situations suivantes, à condition que la source soit située au droit du bâtiment, entre 1 et 12 m de profondeur et que la caractérisation de la «source homogène équivalente» se situe également à une profondeur au-delà ou à la limite de la zone d'influence convective du futur bâtiment :

- Pollution par phase organique dans la ZNS (1b)
- Pollution par phase organique dans la zone de battement de nappe (1c)
- Pollution dissoute dans la nappe (source lointaine avec impact uniquement dissous à cette distance) (3)

L'applicabilité de cette méthodologie aux autres typologies et/ou avec une source située dans la zone convective du caisson est à considérer avec précaution, car l'on se situe en dehors de la zone de développement du modèle semi-empirique.

In fine, il faudra retenir que plus la réalité de la typologie de pollution du sol s'approche d'une source homogène, située au droit du caisson et en-dehors de sa zone convective, plus l'évaluation de la «source homogène équivalente» sera juste.

3.2 Localisation du caisson

Le choix de la zone pour la réalisation des essais avec le caisson doit être réfléchi et pertinent en fonction de l'étude préalable du contexte qui aura été réalisé quant à la caractérisation du site ainsi qu'au projet d'aménagement. En effet, préalablement à la conduite des essais avec le caisson, une bonne caractérisation de la pollution et des terrains est nécessaire reposant sur des diagnostics spécifiques. En fonction de ces différents éléments, il est conseillé de conduire ces essais dans la zone où sera située le futur bâtiment. Il peut également être envisagé de réaliser ces essais sur plusieurs zones, notamment pour compenser les hétérogénéités relatives au sol et au source qui caractérisent les réalités de terrain. Enfin, un essai en fond de fouille d'un bâtiment à construire peut également s'avérer judicieux.

Parallèlement, au regard de l'hétérogénéité spatiale des pollutions de sols et du panache de pollution gazeuse dans la zone non saturée qui peuvent être majeurs, le déploiement du dispositif dans plusieurs endroits dans l'emprise du futur bâtiment peut être nécessaire.

3.3 Réalisation des essais

L'installation correcte du caisson peut s'avérer relativement délicate, notamment pour assurer une bonne étanchéité à l'air au niveau de son ancrage au sol. Cependant, il apparaît qu'au vu de sa taille et de son poids ce dispositif reste relativement facilement transportable, installable et démontable in-situ.

Une fois le caisson installé, il est conseillé de lancer les expérimentations dans un délai assez court (inférieur à un mois selon les conditions météorologiques) afin de conserver l'intégrité des conditions expérimentales, notamment l'étanchéité à l'air de l'ancrage au sol du caisson.

L'influence des conditions hygro-météorologiques sur les panaches de concentrations et *in fine* sur les transferts mesurés avec le dispositif développé peut être significatif [26]. Ainsi, une des contraintes de cette méthodologie est de ne réaliser des essais que lors de conditions hygro-météorologiques favorables. Il faudra veiller en particulier à conduire les essais dans des conditions hygro-météorologiques stables, avec un vent inférieur à 2 m/s et lorsque les températures extérieures ne sont pas trop faibles.

Enfin, concernant la durée des essais, et compte tenu des temps de stabilisation observés dans le cadre de ce projet, elle doit être supérieure à plusieurs heures voire une journée pour obtenir des résultats quasi stabilisés. Plus les terrains sont saturés en eau et plus la durée de l'essai pour l'atteinte du palier devra être élevée.



3.4 Interprétation des résultats

L'interprétation des résultats de cette méthodologie permet de déterminer :

- D'une part, une perméabilité à l'air équivalente du sol situé dans la zone convective sous le caisson. En effet, le modèle analytique développé dans ce projet permet de déterminer le débit d'air passant dans la zone de convection du sol en fonction de la dépression créée entre l'intérieur du caisson expérimental et l'extérieur.
- D'autre part, des couples (concentration, profondeur) correspondant à des « source homogène équivalente » représentatifs de l'émission de la pollution (qui peut être hétérogène) du site réel. Chacun de ces couples est une solution du problème. Il est cependant nécessaire de pouvoir fixer la profondeur de cette source de façon pertinente à la situation réelle que l'on cherche à modéliser afin de pouvoir l'utiliser pour l'étude du problème complet du transfert du polluant du sol vers le bâtiment.

Si les résultats obtenus sont encourageants, on notera que la connaissance des paramètres d'entrée (dépression, taux de renouvellement d'air et palier stable de la concentration extraite du caisson) et les propriétés du sol (perméabilité à l'air et coefficient de diffusion du polluant) est déterminante pour la pertinence de l'interprétation et donc la précision des résultats. Ce point est d'ailleurs également valable pour toute utilisation du modèle de transfert des polluants du sol.

Enfin, il apparaît que cette méthodologie est plus adaptée à une typologie de pollution du sol provenant d'une source homogène, situé au droit du caisson et en-dehors de sa zone convective. Sinon, il peut s'avérer approprié de réaliser plusieurs points de mesure en fonction des hétérogénéités de sources observées et selon l'emprise de la zone de futur bâtiment concerné.

Enfin, les variations spatio-temporelles des concentrations dans les gaz du sol et des transferts dans la zone non saturée nécessitent d'introduire cette dimension dans l'interprétation des mesures.

3.5 Exploitation des résultats

Une fois les résultats expérimentaux interprétés en termes de « source homogène équivalente » à une profondeur donnée, ces données peuvent être utilisées dans les modèles analytiques d'évaluation des concentrations intérieures de bâtiment.

Dans le cadre de ce projet, les derniers développements de modèles analytiques semi-empiriques (Diallo et al. [5]), pouvant notamment tenir compte de spécificités constructives de soubassement de bâtiments ont été confrontés d'une part aux modèles plus classiquement utilisés (J&E, Yao et al., Bakker et al.) ainsi qu'à des résultats expérimentaux ou numériques disponibles. On observe cependant des écarts entre modèles ou par rapport à des résultats expérimentaux souvent difficiles à expliquer (insuffisance de données ou de description de terrain, limite des modèles à représenter des scénarios réels). Aussi, ces derniers modèles analytiques semi-empiriques se situent-ils de façon assez équivalente vis-à-vis des autres modèles au regard des comparaisons effectuées. Ils ont cependant l'avantage de pouvoir se décliner plus précisément sur les différentes typologies de soubassement pouvant être rencontrées.

Enfin, le couplage de ces modèles analytiques semi empiriques de transfert sol/bâtiment avec un modèle de ventilation permet d'évaluer les variations temporelles des concentrations intérieures aux polluants gazeux du sol en tenant compte des caractéristiques propres du bâtiment impactant sur les conditions de transferts et d'exposition intérieure. Cette approche permet ainsi d'apporter une connaissance complémentaire de l'impact relatif de choix de construction dans un projet d'aménagement du terrain : typologie du bâtiment (type de soubassement, éléments géométriques) et des systèmes et régimes de ventilation.

4 Synthèse

Le projet CAPQAI a permis de développer une méthodologie visant 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 bâtiments qui seraient construits sur ces parcelles.

Concernant la méthodologie générale d'évaluation de source homogène équivalente, la pertinence de la méthode et certaines limites ou interrogations ont pu être soulignées. Notamment, on peut retenir que plus la réalité de la typologie de pollution du sol s'approche d'une source plutôt homogène et située au droit du caisson et en-dehors de sa zone convective, plus l'évaluation de la «source homogène équivalente» sera pertinente. A contrario, si la réalité s'éloigne de ces cas (source dans la zone convective du caisson et/ou source hétérogène), l'évaluation risque alors de perdre de sa pertinence.

Une fois cette source homogène équivalente définie pour un site déterminé, elle a été intégrée dans les modèles analytiques semi-empiriques de transfert sol/bâtiment associés à un modèle de ventilation du bâtiment pour l'évaluation de la qualité d'air intérieur, de façon à apprécier les concentrations au sein des ambiances intérieures d'un bâtiment. L'analyse des concentrations sur une année permet ainsi d'évaluer les risques d'exposition dans des configurations réalistes hors variations spatiales et temporelles des concentrations dans les gaz du sol. Ainsi cette méthodologie semble pertinente et prometteuse.

Néanmoins, une limitation forte pour la confortation de la méthodologie est le faible nombre d'expérimentations qui ont pu être exploitées pour l'analyse. Ainsi il serait intéressant de pouvoir tester cette méthodologie sur de nouvelles configurations in-situ.



Références bibliographiques

- [1] T. M. O. Diallo, Impact des polluants gazeux du sol sur la qualité de l'air intérieur des bâtiments, Thèse spécialité Génie Civil. CSTB, LaSIE, Université de la Rochelle, 2013, p. 213.
- [2] DGPR, «Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués,» *Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire*, p. 128, 2017.
- [3] M. Abdelouhab, Contribution à l'étude du transfert des polluants gazeux entre le sol les environnements intérieurs des bâtiments, Thèse CSTB-Université de la Rochelle, 2011, p. 209.
- [4] Diallo et al., Analytical quantification of airflows from soil through building substructures,, vol. 6, *Building Simulation*, 2012, pp. 81-94.
- [5] Diallo et al., 2D Semi-empirical models for predicting the entry of soil gas pollutants into buildings, 1 éd., vol. 85, *Building and Environment*, 2015, pp. 1-16.
- [6] S. Traverse, G. Schäfer, J. Chastanet, C. Hulot, K. Perronnet, B. Collignan, S. Cotel, M. Marcoux, J. Côme, J. Correa, M. Quintard et L. Pepin, Projet FLUXOBAT : Evaluation des transferts de COV du sol vers l'air intérieur et extérieur - Guide Méthodologique, Projet ANR, 2013, p. 257.
- [7] Traverse S., Chastanet J., Hulot H., Gleize T., Richez F., Dorffer L., 2017. Projet TEMPAIR – partie 1. Variabilité temporelle des concentrations en PCE dans les gaz du sol et l'air intérieur. Mars 2017.
- [8] A. Loschetter, L. L. De Lary, O. Bouc, E. Powaga, F. Grandia, H. Davarzani, M. Marcoux et B. Collignan, Projet IMPACT-CO2 : Rapport final , BRGM/RP-66367-FR, Novembre 2016.
- [9] S. Traverse, J. Chastanet, Z. Romani, C. Hulot, E. Powaga, B. Collignan et N. Picard, Projet CAPQAI - Résultats expérimentaux de la tâche 2, Janvier 2018. rapport confidentiel.
- [10] M. Abadie, Z. Romani et E. Powaga, Projet CAPQAI - Livrable T3 : Validation des modèles analytiques et prédiction des expositions intérieures dues aux transfert des polluants du sol à partir des mesures in situ, Janvier 2018. rapport confidentiel..
- [11] W. W. Nazaroff, H. Feustel, A. V. Nero, K. L. Revzan et D. T. Grimsrud, «Radon transport into a detached one-story house with a basement.,» *Atmospheric Environment*,, vol. 19, pp. 31-46, 1985.
- [12] N. W.W., «Predicting the rate of 222Rn entry from soil into basement of a dwelling due to pressure-driven air flow,» *Radiation Protection Dosimetry* , vol. 24 , n° %11/4 , pp. 199-202, 1988.
- [13] P. Johnson et R. Ettinger, «Heuristic model for predicting the intrusion rate of contaminant vapors into buildings,» *Environmental Science Technologies* , vol. 25, pp. 1445-1452, 1991.
- [14] J. Little, J. Daisey et W. Nazaroff, «Transport of subsurface contaminants into buildings,» *Environmental Science & Technology* , vol. 26, pp. 2058-2066, 1992.
- [15] A. Gadgil, Y. Bonnefous et W. Fisk, « Relative effectiveness of Sub-Slab Pressurization and Depressurization Systems for Indoor Radon Mitigation: Studies with an Experimentally Verified Numerical Model,» *Proceedings of the 1992 international symposium on Radon*, 1992.
- [16] Y. Yao, K. Pennell et E. Suuberg, «Estimation of contaminant subslab concentration in vapor intrusion,» *Journal of hazardous materials*, vol. 6, pp. 231-232, 2012.
- [17] Y. Yao, R. Shen, K. Pennell et E. Suuberg, «A review of vapor intrusion models,» *Environ Science & Technoly* , pp. 2457-2570, 2013.
- [18] B. O. S. , E. M. Pennell K. G, «Vapor Intrusion Site Characterization-- Why Invest the Time, Effort and Money in Modeling?,» *Brown University, Division of Engineering*,, 2009.
- [19] F. Tillman et J. Weaver, «Review of Recent Research on Vapor Intrusion,» *U.S. Environmental Protection Agency*, n° %1EPA/600/R-05/106, 2005.
- [20] J. Provoost, A. Bosman, L. Reijnders, J. Bronders, K. Touchant et F. Swartjes, «Vapour intrusion from the vadose zone—seven algorithms compared,» *Journal of Soils and Sediments*, vol. 10, pp. 473-483 , 2010.
- [21] P. C. Johnson, M. B. Hertz et D. L. .. Beyers, «Estimates for hydrocarbon vapor emissions resulting from service station remediations and buried gasoline-contaminated soils,» *Petroleum Contaminated Soils*, vol. 3, 1990.



- [22] J. Bakker, J. Lijzen et v. W. H. , « Site-specific human risk assessment of soil contamination with volatile compounds,» *RIVM (National Institute of Public Health and the Environment Bilthoven*, n° %1 711701049, p. 140, 2008.
- [23] M. Waitz, J. Freijer, P. Kreule et F. Swartjes, « The Volasoil risk assessment model based on Csoil for soils contaminated with volatile compounds,» *National Intitute for public Health and the environment*, 1996 .
- [24] N. W.W., «Radon transport from soil to air,» *Reviews of Geophysics*, vol. 30, pp. 137-160, 1992.
- [25] F. Demouge et X. Faure, «Natural Ventilation Design for Low-Rise Building: Comparison between a Nodal Model and Wind Tunnel Tests,» *IBPSA Building Simulation*, Chambéry, France, 2013.
- [26] Chastanet J., Traverse S., Côme JM. (2018). Projet EFEMAIR. 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

Index des tableaux et figures

Tableaux ⁽ⁱ⁾

Tableau 1 : Conditions expérimentales et mesures des essais n°3 et n°10.	14
Tableau 2 : Paramètres commun relatif au cas de référence.	17
Tableau 3 : Caractéristiques du sol modélisé.	17
Tableau 4 : Concentrations moyenne annuelle, minimum et maximum des différentes configurations de bâtiment modélisées.....	20
Tableau 5 : Typologies de pollution des sols au regard d'un bâtiment.	21

Figures⁽ⁱ⁾

Figure 1 : Entrée des polluants gazeux du sol dans les bâtiments	6
Figure 2 : Principe de fonctionnement du caisson expérimental.....	7
Figure 3 : Principe d'obtention de conditions stabilisées dans le caisson	8
Figure 4 : Schématisation des typologies de soubassements prise en compte dans les modèles SEM ([5])	10
Figure 5 : Schématisation de l'association des modèles SEM à un modèle numérique d'évaluation de la ventilation des bâtiments.	11
Figure 6 : Plan du site et de la zone étudiée (zone nord).	12
Figure 7 : Vues de la zone instrumentée.....	13
Figure 8 : Schématisation de la zone instrumentée.	13
Figure 9 : Présentation des étapes d'installation du caisson sur site.	14
Figure 10 : Evolution des concentrations en polluant dans le caisson et sous l'interface.	15
Figure 11 : Profils de concentrations mesurées (en noir) et modélisées sous le caisson (couleur).	15
Figure 12 : comparaison entre les valeurs de perméabilités à l'air équivalentes calculées (orange) et les valeurs mesurées (bleu).	16
Figure 13 : Plan des niveaux de la maison de référence	17
Figure 14 : Exemples d'évolution temporelle dans le cas de la VMC par extraction.	19



L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition Écologique et Solidaire et du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.





PROJET CAPQAI - LIVRABLE T4.2 : Méthodologie de caractérisation des sols pollués pour l'évaluation de leur impact sur les expositions intérieures dans les bâtiments

DOCUMENT PUBLIC

Le projet CAPQAI vise à compléter les outils et les méthodes permettant, d'une part, de caractériser in situ des sols pollués, et d'autre part, d'évaluer leur impact sur la qualité de l'air des environnements intérieurs de bâtiments qui seraient construits sur ces parcelles.

Ce livrable public présente les grands principes de la méthodologie qui se décompose en trois étapes principales, à savoir :

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

Son cadre expérimental de test in-situ est ensuite présenté. Enfin une analyse critique des limites et potentialités de cette méthodologie fait ressortir l'intérêt de cet outil à utiliser en complémentarité des outils de gestion actuels et le besoin de tester de façon plus systématique sa pertinence sur d'autres configurations.

Le développement d'outils de diagnostics efficaces pour l'évaluation de l'impact sanitaire du transfert de polluants gazeux du sol dans les bâtiments est rendu nécessaire pour l'optimisation de la gestion des sols à pollution résiduelle.

*Cette étude présente une **méthodologie innovante** d'évaluation de l'entrée dans les bâtiments et de la concentration intérieure en polluants du sol par l'association d'une métrologie ad hoc de **caractérisation du sol** et d'une **modélisation couplant des modèles analytiques de transferts à des modèles numériques d'évaluation de la qualité d'air intérieur des bâtiments***

