

**CSTB - Gestion de la qualité sanitaire des espaces clos :  
amélioration des outils de gestion de l'impact des  
polluants gazeux des sols en relation avec la qualité de  
l'air intérieur des bâtiments**

B. Collignan, E. Powaga, T. Diallo

► **To cite this version:**

B. Collignan, E. Powaga, T. Diallo. CSTB - Gestion de la qualité sanitaire des espaces clos : amélioration des outils de gestion de l'impact des polluants gazeux des sols en relation avec la qualité de l'air intérieur des bâtiments. 2013. hal-01057501

**HAL Id: hal-01057501**

**<https://hal-cstb.archives-ouvertes.fr/hal-01057501>**

Submitted on 22 Aug 2014

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

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

**Usage - Santé - Confort**

**Gestion de la qualité sanitaire des espaces  
clos**

**Amélioration des outils de gestion de l'impact des  
polluants gazeux des sols en relation avec la  
qualité de l'air intérieur des bâtiments**

**Rapport de synthèse**

COLLIGNAN Bernard, POWAGA Emilie, DIALLO Thierno

Université Paris-Est, Centre scientifique et technique du bâtiment, Direction  
santé confort, Division physico-chimie - sources et transferts de polluants

**10 décembre 2013**

DSC PST 2013-155

**CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT**

SIÈGE SOCIAL > 84 AVENUE JEAN JAURÈS | CHAMPS-SUR-MARNE | 77447 MARNE-LA-VALLÉE CEDEX 2

TÉL. (33) 01 64 68 82 82 | FAX. (33) 01 60 05 70 37 | SIRET 775 688 229 000 27 | [www.cstb.fr](http://www.cstb.fr)

ÉTABLISSEMENT PUBLIC À CARACTÈRE INDUSTRIEL ET COMMERCIAL | RCS MEAUX 775 688 229 | TVA FR 70 775 688 229

MARNE-LA-VALLÉE | PARIS | GRENOBLE | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS

© 2014 CSTB



Ce texte est distribué sous les termes de la licence Creative Commons Attribution 3.0 non transposé **(CC BY 3.0)**

Le texte complet de la licence est disponible à l'adresse suivante :  
<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode>

Résumé des droits et conditions de la licence :

⇒ **Vous êtes libre de :**

- partager (reproduire, distribuer et communiquer) l'œuvre ;
- remixer, adapter l'œuvre ;
- d'utiliser cette œuvre à des fins commerciales.

⇒ **Selon les conditions suivantes :**

- Attribution (paternité, crédit) : vous devez attribuer l'œuvre de la manière indiquée par l'auteur de l'œuvre ou le titulaire des droits (mais pas d'une manière qui suggérerait qu'ils vous approuvent, vous ou votre utilisation de l'œuvre).

Toute citation d'extraits, reproduction ou utilisation doit obligatoirement faire apparaître la référence de ce document sous la forme : **Collignan B, Powaga E, Diallo T., Gestion de la qualité sanitaire des espaces clos : amélioration des outils de gestion de l'impact des polluants gazeux des sols en relation avec la qualité de l'air intérieur des bâtiments, CSTB, décembre 2013, 37 p. (DSC/PST/13-155R)**

⇒ **Comprenant bien que**

- les droits suivants ne sont en aucune manière affectés par la licence :
  - Vos prérogatives issues des exceptions et limitations aux droits exclusifs ou *fair use* ;
  - Les droits moraux de l'auteur que rien dans ce contrat ne diminue ou ne restreint.
- A chaque réutilisation ou distribution de cette œuvre, vous devez faire apparaître clairement au public la licence selon laquelle elle est mise à disposition. La meilleure manière de l'indiquer est un lien vers cette page web : <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/deed.fr>.

## Résumé

L'entrée des polluants gazeux du sol (Radon, COV,...) dans les environnements intérieurs peut occasionner des risques sanitaires significatifs. Or les modèles d'évaluation des risques sanitaires liés à ces polluants gazeux du sol contiennent beaucoup d'incertitudes qui peuvent conduire à une mauvaise appréciation de ces risques.

Dans un premier temps, cette recherche contribue à l'amélioration des modèles d'évaluation des risques. Dans un second temps, elle propose le développement d'un modèle de dimensionnement des Systèmes de Dépressurisation du Sol (SDS) passifs utilisés pour protéger les bâtiments des pollutions gazeuses venant du sol.

L'amélioration des modèles a porté sur la prise en compte des principaux phénomènes de convection et de diffusion à l'interface entre le sol et le bâtiment en tenant compte des différentes typologies de soubassement.

La première contribution porte sur le développement de modèles analytiques fournissant les débits d'air dus à la convection à travers le sol pour différents types de soubassement : dallage indépendant, dalle portée, vide sanitaire et cave. Les bâtiments avec des murs enterrés et les soubassements avec un lit de gravier sous le plancher bas sont également traités. Une méthodologie permettant la prise en compte de la fissuration et des points singuliers du plancher bas est aussi proposée.

La deuxième contribution porte sur la prise en compte du transfert couplé des polluants des sols par convection et diffusion auprès des fondations. Une étude numérique a permis une meilleure compréhension du comportement des polluants à l'interface sol/bâtiment. Sur la base de cette compréhension, des lois semi-empiriques d'estimation des flux d'entrée de polluant dans les bâtiments sont proposées.

Les différents modèles développés ont été validés numériquement avec un modèle CFD et expérimentalement avec des données issues de la littérature. La confrontation de ces modèles avec ceux existants a montré les améliorations apportées. L'impact de la typologie du soubassement sur le transfert de polluants gazeux des sols a été constaté.

Une première application des modèles est illustrée par leur intégration dans un code de simulation thermo-aéraulique multizone afin de pouvoir étudier l'impact de ces polluants sur la qualité de l'air intérieur.

Ce travail se termine par le développement d'un modèle de dimensionnement des SDS passifs. Ce modèle aéraulique de dimensionnement des SDS a été validé par 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) sur le fonctionnement du SDS passif 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.

Ces travaux ont été en partie subventionnés par l'ADEME.

**Mots clés** : polluants gazeux du sol, Radon, COV, bâtiment, modélisation, modèles d'évaluation des expositions, qualité de l'air intérieur, système de dépressurisation du sol, dimensionnement

## Abstract

Transfer of soil gas pollutants (Radon, VOC) into buildings can cause significant health risks. However, analytical models used today to estimate health risks associated with these pollutants contain many uncertainties which can lead to poor risk assessment. Initially, the main objective of this research is to contribute to the improvement of these models for risk assessment. Secondly, the development of air flow model for passive Sub slab Depressurization Systems (SDS) design used to protect buildings is proposed. The improvement of models focused on the inclusion of the main phenomena of convection and diffusion at building/soil interface, taking into account different types of building substructures.

The first improvement concerns the assessment of convection phenomenon through the development of analytical models to quantify air flow rates entering through many kinds of building substructures: floating slab, bearing slab, crawl space and basement. Buildings with buried walls and substructures with a sub slab gravel layer are also treated. A methodology taking into account the presence of cracks, holes and singular leakages of the slab is also proposed.

The second improvement of the models is the inclusion of coupled transfer of convection and diffusion near foundations. A numerical study allowed a better understanding of the behavior of pollutants at soil / building interface. Based on this understanding, semi-empirical laws for estimating soil gas pollutants entry rate into buildings are proposed.

The various models developed have been validated numerically using a CFD model and experimentally with data from the literature when available. The impact of building substructure on pollutant transfer has been highlighted.

A first application of the models is illustrated by their integration into a multizone simulation code to study the impact of these transfers on indoor air quality.

Finally, the work ends with the development of a model for designing passive sub slab depressurization systems. The design model developed is validated with *in situ* experimental data. Preliminary applications using this model focused at first on the impact of meteorological conditions (stack effect, wind) on the sub slab system running. At second, the impact of ventilation strategies on sub slab depressurization performance is studied.

Thus, the potential interest of this model to test the effective running of passive sub slab depressurization systems in given configuration is shown.

This work was partly funded by ADEME.

**Keywords:** soil gas pollutants, Radon, COV, building, modeling, risk assessment model, indoor air quality, sub-slab depressurization, design

## Table des matières

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>6</b>
<b>1. DÉVELOPPEMENT DE MODÈLES D'ÉVALUATION DES EXPOSITIONS INTÉRIEURES .....</b>	<b>8</b>
<b>1.1 développement de modèles analytiques .....</b>	<b>8</b>
1.1.1 Synthèse bibliographique .....	8
1.1.2 Quantification analytique du débit d'air venant du sol .....	10
1.1.3 Quantification analytique du flux de polluant venant du sol.....	12
<b>1.2 Intégration des modèles analytiques dans un modèle numérique         aéraulique du bâtiment.....</b>	<b>14</b>
<b>1.3 Perspective pour les modèles d'évaluation des risques .....</b>	<b>15</b>
<b>2. DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE DIMENSIONNEMENT DE SYSTÈME DE DÉPRESSURISATION DES SOLS (SDS) PASSIF. ....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 modèle de SDS passif.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2 Confrontation expérimentale et étude de sensibilité.....</b>	<b>20</b>
<b>2.3 Développement d'un prototype d'outil de dimensionnement .....</b>	<b>22</b>
<b>2.4 Résultats obtenus et perspectives : .....</b>	<b>23</b>
<b>3. PUBLICATIONS.....</b>	<b>25</b>
<b>Liste des références.....</b>	<b>26</b>

## INTRODUCTION

L'entrée et l'accumulation de polluants gazeux venant du sol dans les environnements intérieurs peuvent entraîner des situations de risques sanitaires accrus. A l'heure actuelle, il existe une pression socio-économique forte pour la réutilisation de friches industrielles, souvent situées en zone péri urbaines. Sachant qu'il peut exister une pollution résiduelle dans les sols, l'objectif est alors de rendre ces terrains viables pour la construction de bâtiments d'habitation ou tertiaires. Les outils d'évaluation des risques liés à ces polluants 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 conduisent à une mauvaise appréciation des risques ne permettant pas une gestion optimale des situations. Notamment, les friches industrielles réhabilitées pour l'habitat ou le tertiaire peuvent potentiellement générer des risques sanitaires ou inversement, un coût économique excessif pour la protection des bâtiments vis-à-vis d'agents chimiques présents dans les sols, si l'évaluation du risque a été mal appréciée.

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

Dans ce contexte, les objectifs de cette recherche entrent dans le cadre de l'étude de l'impact des pollutions des sols sur les environnements intérieurs et visent à mieux maîtriser les flux de contaminants, notamment par une meilleure compréhension des transferts gazeux vers les bâtiments. Sur la base de travaux antérieurs réalisés au CSTB, les travaux entrepris ont été :

- d'une part, de contribuer à améliorer les outils de gestion des sols pollués qui contiennent beaucoup d'incertitudes, afin de mieux évaluer l'impact des pollutions gazeuses des sols sur la qualité de l'air intérieur des bâtiments. La prise en compte des différentes typologies de soubassement de bâtiment pouvant exister a été améliorée ainsi que celle des phénomènes à l'interface entre le sol et le bâtiment (convection et diffusion), mais aussi le transport dans le bâtiment en tenant compte des phénomènes principaux comme le tirage thermique, l'effet du vent et l'effet des systèmes de ventilation.
- d'autre part, un travail a été conduit visant les conditions de fonctionnement de solutions innovantes pour protéger les bâtiments de ces pollutions gazeuses venant du sol, solutions qui pourraient à terme être intégrées en complémentarité de gestion pour la reconquête des friches industrielles.

Dans un premier temps, cette étude contribue donc à l'amélioration des modèles d'évaluation des risques. Dans un second temps, elle propose le développement d'un modèle de dimensionnement des conditions de fonctionnement des Systèmes de Dépressurisation du Sol (SDS) passifs utilisés pour protéger les bâtiments des pollutions gazeuses venant du sol selon leurs contextes et environnements (implantation des bâtiments - tirage thermique, effet du vent - et du système de ventilation des bâtiments).

L'amélioration des modèles a porté sur la prise en compte plus réaliste des débits d'air venant du sol ainsi que des principaux phénomènes de convection et de diffusion à l'interface entre le sol et le bâtiment en tenant compte des différentes typologies de soubassement.

La première contribution porte sur le développement de modèles analytiques fournissant les débits d'air dus à la convection à travers le sol pour différents types de soubassement : dallage indépendant, dalle portée, vide sanitaire et cave. Les bâtiments avec des murs enterrés et les soubassements avec un lit de gravier sous le plancher bas

sont également traités. Une méthodologie permettant la prise en compte de la fissuration et des points singuliers du plancher bas est aussi proposée.

La deuxième contribution porte sur la prise en compte du transfert couplé des polluants des sols par convection et diffusion auprès des fondations. Une étude numérique a permis une meilleure compréhension du comportement des polluants à l'interface sol/bâtiment. Sur la base de cette compréhension, des lois semi-empiriques d'estimation des flux d'entrée de polluant dans les bâtiments sont proposées.

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 ceux existants a montré les améliorations apportées. L'impact de la typologie du soubassement sur le transfert de polluants gazeux des sols a été constaté.

Une première application des modèles semi-empiriques est illustrée par leur intégration dans un code de simulation thermo-aéraulique multizone afin de pouvoir étudier l'impact de ces polluants sur la qualité de l'air intérieur. 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 de type CFD par exemple. Sur la base de ces résultats, on donne des perspectives pour l'intégration possible de ces travaux relatifs à l'amélioration des modèles d'évaluation de risques, dans le contexte actuel.

Cette étude traite dans une deuxième partie du développement d'un modèle de dimensionnement des conditions de fonctionnement des SDS passifs. Ce modèle aéraulique de dimensionnement des SDS a été intégré dans un modèle aéraulique du bâtiment afin de pouvoir en étudier le 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 de ces résultats, un prototype d'outil de dimensionnement a été réalisé afin de tester l'aptitude mécanique d'un tel système en fonction de certaines caractéristiques du bâtiment, de son environnement et de données météorologiques.



# 1. DÉVELOPPEMENT DE MODÈLES D'ÉVALUATION DES EXPOSITIONS INTÉRIEURES

## 1.1 DÉVELOPPEMENT DE MODÈLES ANALYTIQUES

### 1.1.1 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Les polluants gazeux du sol (radon, hydrocarbures provenant des déversements de carburant souterrains, composés organiques volatils et composés organiques chlorés associés à des décharges des anciennes activités industrielles ou des eaux souterraines contaminées,...), entrent dans les bâtiments principalement par transport convectif et diffusif, à travers plusieurs types d'entrées : les fissures, les trous, les traversées de réseau (eau, électricité, plomberie,...), la macroporosité des matériaux des fondations et plus généralement toutes les surfaces en contact avec le sol.

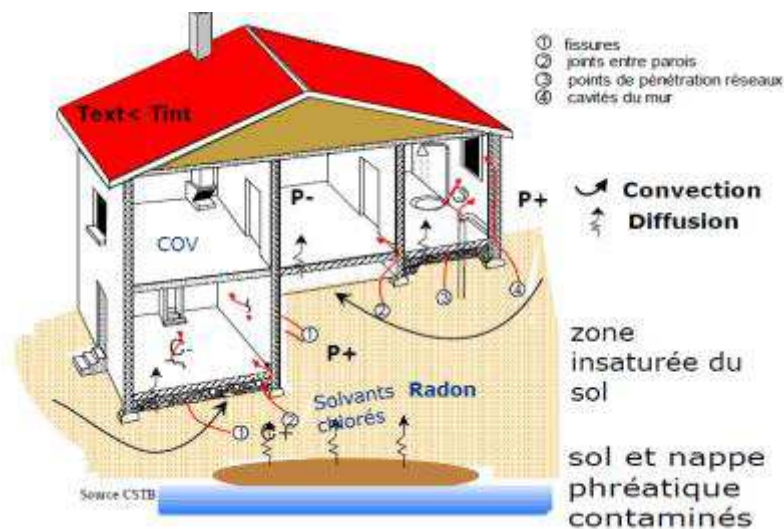


Figure 1 : Entrée des polluants gazeux du sol dans un bâtiment

L'étude bibliographique a montré que le transport des polluants gazeux du sol vers le bâtiment est principalement gouverné par la convection et la diffusion. Le phénomène de convection est lié à la dépression du bâtiment, elle-même due aux effets combinés de tirage thermique, du vent et du système de ventilation, en fonction d'un ensemble de caractéristique du bâtiment et de son environnement (Nazaroff, 1992). Le phénomène de diffusion est lié à la différence de concentration en polluant gazeux qui existe entre le sol et le bâtiment. La diffusion est considérée comme prépondérante dans le sol loin des fondations. Cependant, à proximité des fondations, les deux phénomènes peuvent contribuer au transfert des polluants dans le bâtiment.

À ce jour, on peut constater dans les modèles analytiques actuels un manque d'exhaustivité dans la prise en compte des typologies de soubassement sur l'estimation du débit d'air convectif. L'estimation de ce débit d'air est pourtant très importante puisque ce dernier est le moteur de la convection. L'analyse critique des modèles analytiques d'évaluation des risques à l'entrée de polluants gazeux du sol a fait également ressortir quelques lacunes sur la prise en compte du transfert combiné de la convection et de la diffusion auprès des fondations, notamment sur les conditions aux limites de la prise compte de la convection, sur la zone d'influence de la convection et sur l'influence relative des phénomènes de convection et diffusion.

Ainsi, ces modèles actuellement utilisés pour quantifier le transport des polluants gazeux dans les bâtiments contiennent beaucoup d'incertitudes (Provoost et al., 2010). Cette étude montre que les modèles d'évaluation des risques sanitaires liés à l'entrée des polluants gazeux du sol dans les bâtiments tendent généralement à surestimer les prédictions de la concentration intérieure du polluant de plusieurs ordres de grandeur (Figure 2). Hulot et al. (Hulot et al., 2010) ont aussi trouvé que les modèles de Johnson et Ettinger et Volasoil sous-estiment ou parfois surestiment la concentration du polluant dans le bâtiment.

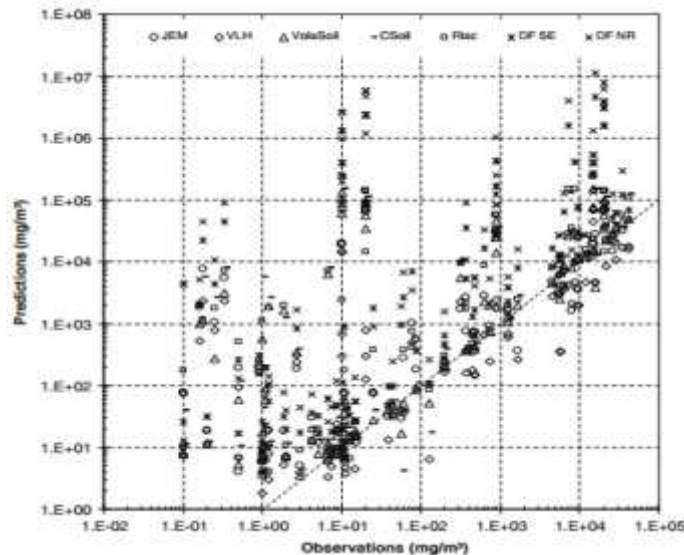


Figure 2 : Comparaison de 7 modèles d'évaluation de risques sanitaires (Provoost et al., 2010)

Vu les incertitudes existantes sur ces modèles analytiques utilisés pour l'évaluation des risques sanitaires liés aux polluants gazeux du sol et compte tenu des limites relatives à la prise en compte des mécanismes de transfert des polluants dans les environnements intérieurs - notamment pour ce qui concerne l'impact de différentes typologies de soubassement sur les transferts convectifs ainsi que pour la prise en compte du phénomène diffusif, couplé au phénomène convectif -, il apparaît comme une nécessité d'améliorer ces modèles.

### 1.1.2 QUANTIFICATION ANALYTIQUE DU DÉBIT D'AIR VENANT DU SOL

Une faiblesse importante des modèles actuels d'évaluation des expositions est le manque d'exhaustivité dans la prise en compte des différentes typologies de soubassement pour l'estimation du débit d'air venant du sol et entrant dans le bâtiment. Par ailleurs, une autre limite de ces modèles est la non prise en compte de la fissuration et des points singuliers du plancher bas.

Le travail synthétisé dans ce paragraphe apporte une contribution pour ces deux aspects.

D'une part la prise en considération des typologies de soubassement les plus courantes sur l'estimation du débit d'air convectif du sol vers un bâtiment (figure 3) :

- dallage indépendant sur terre-plein,
- dalle portée,
- vide sanitaire.

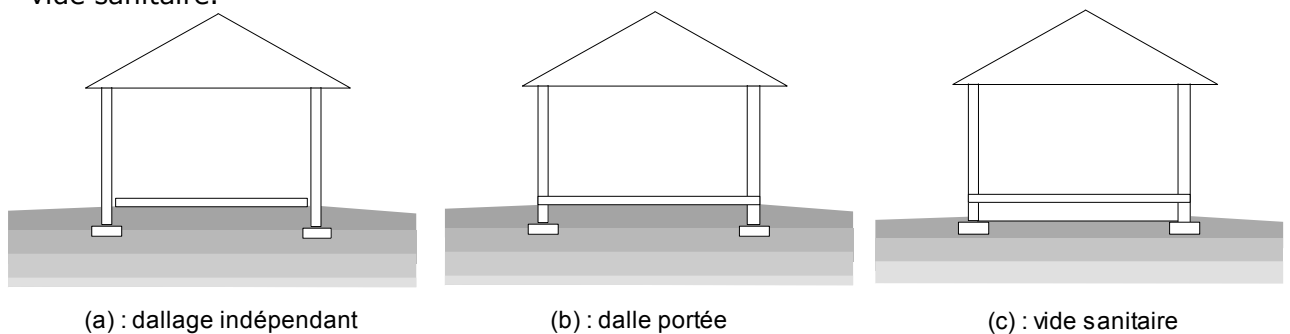


Figure 3 : schéma des types de soubassements

On a traité également les typologies de soubassements particuliers à savoir :

- les fondations avec des murs enterrés ;
- et celles possédant un lit gravier sous le plancher bas, correspondant à la configuration d'usage pour les dallages ou dalle.

L'objectif *in fine* est d'obtenir pour chaque typologie, une loi analytique de l'expression du débit d'air venant du sol et entrant dans le bâtiment, en fonction de la dépression intérieure de ce dernier et de l'ensemble des paramètres du problème (géométrie du soubassement, perméabilités du sol et des planchers). Ces lois linéaires, de forme débit-pression ( $Q=k \Delta P$ ) peuvent ainsi facilement être intégrées dans un code de ventilation multizone dédié à l'étude de la qualité de l'air intérieur, ou bien dans un modèle d'évaluation des risques sanitaires liés aux polluants gazeux du sol comme ceux proposés par Johnson et Ettinger, 1991; Waitz et al., 1996; Krylov et Fergusson, 1998, etc.

D'autre part, une approche plus générale est proposée pour tenir compte de la présence de défauts d'étanchéité singuliers et des macrofissures dans la perméabilité à l'air des planchers. Cette approche consiste à repérer ces points singuliers et fissures, à estimer leurs dimensions, à les classer en trois catégories selon leur géométrie, et enfin à quantifier leur perméabilité dite « équivalente » par une équation analytique simple. Cette perméabilité « équivalente » du plancher peut être facilement intégrée dans les modèles de débits d'air développés.

Afin de développer les modèles analytiques, une étude numérique exhaustive sur les différentes typologies a été préalablement réalisée pour observer et poser des hypothèses sur l'évolution des lignes de courant dans les différents milieux. Par ailleurs, ces résultats ont servi de cadre de confrontation avec les résultats issus des modèles analytiques développés.

Par rapport aux modèles existants, ces modèles analytiques apportent :

- Une limite précise de la zone d'influence de l'écoulement de l'air (de la convection) auprès des fondations ;
- Un traitement séparé et exhaustif des typologies les plus couramment rencontrées ;
- Une prise en compte d'un lit de gravier éventuel sous le plancher bas ;
- Une prise en compte des murs enterrés et de l'hétérogénéité du sol environnant une cave ;
- Une prise en compte plus physique et moins conservatrice de la fissuration et des points singuliers.

La confrontation des résultats issus des modèles analytiques avec les résultats numériques (CFD) a été satisfaisante. Des résultats expérimentaux tirés de la littérature ont permis la confrontation expérimentale qui a été également satisfaisante.

Le calcul des débits d'air en fonction des différentes typologies pouvant exister a montré que ce dernier dépend fortement de la typologie du soubassement, toute chose égale par ailleurs (niveau de pression du bâtiment, perméabilité à l'air du sol). Il est donc illusoire de vouloir utiliser la même loi de débit pour toutes les typologies de soubassement comme réalisé jusqu'alors, d'où l'intérêt des modèles développés.

A titre illustratif, la figure 4 montre les niveaux de débits d'air obtenus pour les trois typologies de soubassement classiques et pour un niveau de dépression du bâtiment de 4 Pa.

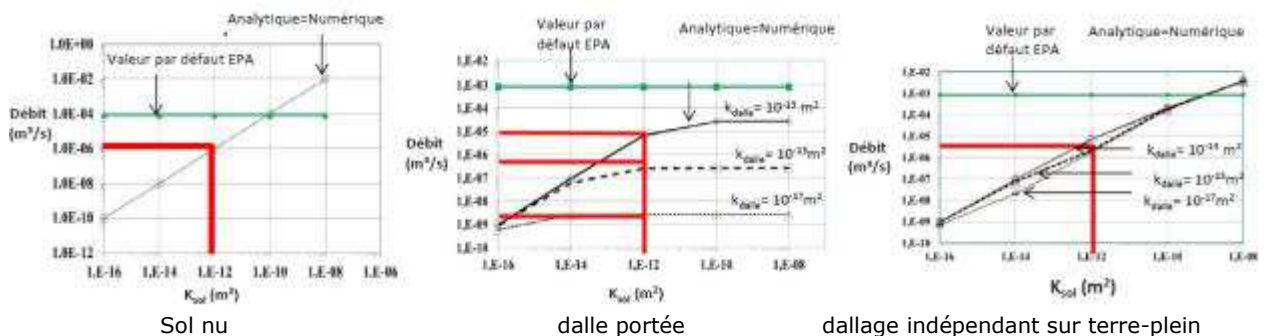


Figure 4 : Débits d'air obtenus pour les trois typologies de soubassement classiques et pour un niveau de dépression du bâtiment de 4 Pa.

On constate ainsi la grande variabilité possible de plusieurs ordre de grandeur du débit d'air entrant dans le bâtiment et l'écart possible avec la valeur par défaut (courbe verte) proposée par l'Agence de protection de l'environnement américaine (EPA). A titre illustratif, la figure 4 montre cette variabilité. Si l'on prend l'exemple d'un bâtiment soumis à 4 Pa de dépressurisation sur un sol de perméabilité à l'air de  $10^{-12} \text{ m}^2$ , la valeur par défaut de l'EPA est de l'ordre de  $10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ . Dans le cas d'un sol nu, notre modèle donne une valeur de l'ordre de  $10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ . Dans le cas de dalle portée, on obtient des valeurs, d'environ  $3 \cdot 10^{-9}$ ,  $2 \cdot 10^{-7}$  et  $9 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  pour des perméabilités de dalle de  $10^{-17}$ ,  $10^{-15}$  et  $10^{-13} \text{ m}^2$  respectivement. Pour un dallage indépendant sur terre-plein, on obtient un débit d'air compris entre  $10^{-6}$  et  $10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  selon la perméabilité du dallage et pour une fissure périphérique de 1 mm.

Cette comparaison montre bien l'imprécision qu'on peut apporter en négligeant l'impact du type de typologie sur les débits d'air et ainsi montre l'intérêt des développements analytiques réalisés.

Cependant, si l'on souhaite utiliser directement ces modèles, une incertitude demeure quant à la concentration en polluant contenue dans le sol à leur associer, que ce soit

pour une utilisation dans les modèles d'évaluation existant ou pour intégrer dans des modèles aérauliques. En effet, le transport diffusif n'y est pas pris en compte alors qu'il peut influencer sur le transport.

Aussi, l'étude du transport couplé convectif-diffusif est présentée dans le chapitre suivant ainsi que le développement de modèles convectif-diffusif couplés du transport des polluants gazeux du sol dans les bâtiments pour différentes typologies de soubassement.

### **1.1.3 QUANTIFICATION ANALYTIQUE DU FLUX DE POLLUANT VENANT DU SOL**

La littérature, dans le domaine du transport des polluants gazeux du sol (radon ou substances volatiles) dans les bâtiments présente quelques études (Jiranek, 2000 ; Loureiro et al. ,1990 ; Adomait, 1992 ; Yao et al, 2012 ; Abreu et Johnson, 2005), notamment numériques à travers l'utilisation de modèles CFD bi dimensionnels ou tri dimensionnels, mettant en avant l'impact important, voire prépondérant, du transport diffusif dans les sols à proximité des fondations.

L'analyse bibliographique relative aux modèles analytiques existants de transfert de polluants gazeux du sol dans les bâtiments a également mis en évidence quelques défauts sur la prise en compte des phénomènes de convection/diffusion auprès des fondations.

Les principaux défauts ressortis sont :

- Le manque de clarté sur la prise en compte des mécanismes de transfert à l'interface entre le sol et le bâtiment pour différentes typologies de soubassement : dalle portée, dallage indépendant et vide sanitaire ;
- Le manque de compréhension de l'influence relative des principaux mécanismes de transfert en jeu ;
- L'imprécision sur les conditions aux limites du transport couplé de convection et diffusion auprès des fondations ;
- La non prise en compte du transport bidimensionnel, voire tridimensionnel, qui pourrait surestimer le flux d'entrée du polluant dans le bâtiment ;
- La non prise en compte du flux de polluant allant vers l'atmosphère qui pourrait surestimer le flux d'entrée de polluant dans le bâtiment, surtout pour une source de pollution située à proximité des fondations.

Eu égard à ces défauts, dans ce paragraphe on propose d'apporter :

- Une meilleure compréhension du comportement des polluants à proximité des fondations à travers une étude numérique à l'aide du code numérique CFD Comsol. Cette étude numérique 2-D prend en compte les transferts couplés de la convection et de la diffusion du polluant depuis la zone non saturée (ZNS) jusqu'à l'intérieur du bâtiment ;
- Sur la base de la compréhension des mécanismes de transfert en jeu, des modèles de transfert semi-empiriques de polluants gazeux du sol vers les environnements intérieurs, tenant compte de la convection et la diffusion, ont été développés. Une méthode de prise en compte des typologies particulières de soubassement avec des murs enterrés ou un lit de gravier sous le plancher bas est également proposée.

Ces travaux ont permis d'appréhender le comportement des polluants auprès des fondations. Il s'est dégagé que pour toutes les typologies de soubassement (dalle portée, dallage indépendant, vide sanitaire), le phénomène de diffusion est prépondérant.

Cependant, la convection a une influence non négligeable sur le transfert global, notamment en fonction de la perméabilité du sol lorsque celle-ci augmente. Cette compréhension des phénomènes a permis d'établir une méthodologie permettant de définir des lois semi-empiriques de flux de polluant entrant dans les bâtiments pour différentes typologies de soubassement. Une méthode de prise en compte des typologies particulières comprenant des murs enterrés et un lit de gravier sous le plancher bas est proposée. Ces lois peuvent aussi prendre en compte l'hétérogénéité par couche du sol.

La comparaison des modèles semi-empiriques développés avec les modèles existants a permis de faire ressortir les améliorations apportées, notamment par la prise en compte de l'effet bi dimensionnel du transport dans les sols, le couplage fort de la convection et de la diffusion auprès des fondations et l'éventuel transfert du polluant vers l'atmosphère. Généralement, la non prise en compte de ces différents facteurs tend à surestimer le flux d'entrée du polluant dans le bâtiment.

Cette comparaison a fait également ressortir la tendance générale des modèles actuels (Johnson et Ettinger, Volasoil) à surestimer l'entrée du flux de polluant de plusieurs ordres de grandeurs dans le bâtiment et ainsi à surestimer l'évaluation des risques sanitaires.

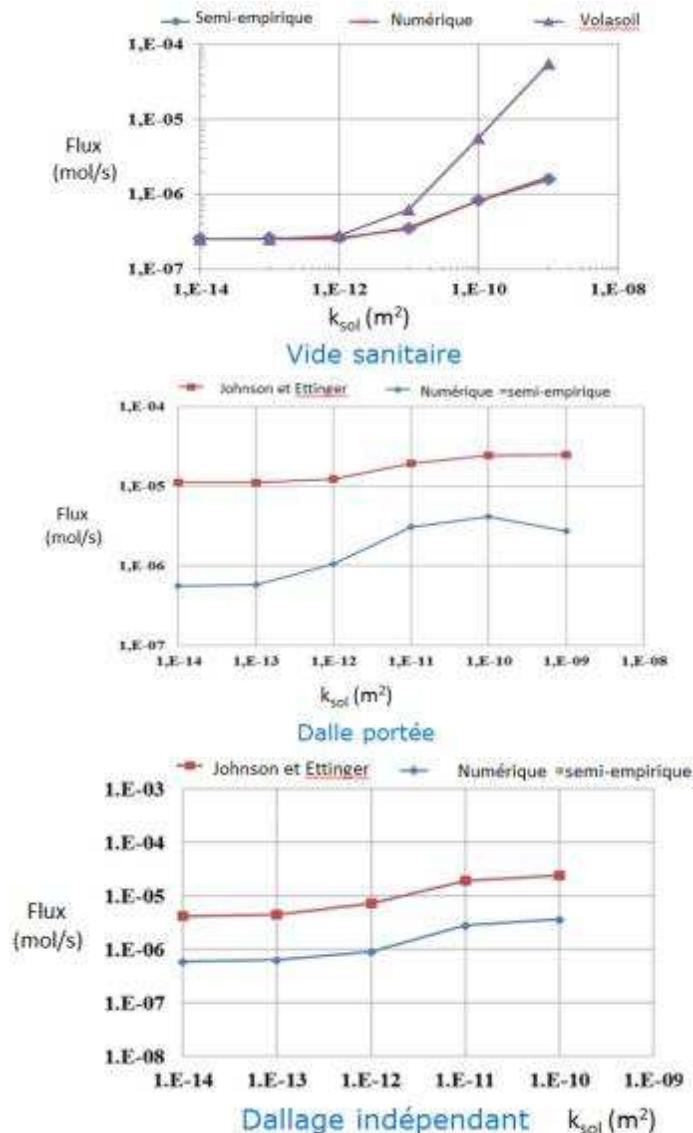




Figure 5 : Comparaison des flux de polluant entrant dans un bâtiment pour les trois typologies (vide sanitaire, dalle portée, dallage indépendant)

Sur la base des données *in situ* disponibles, les premières confrontations expérimentales réalisées ont été satisfaisantes. Les modèles développés peuvent ainsi prédire le même ordre de grandeur que la réalité constatée expérimentalement sur les quelques cas étudiés.

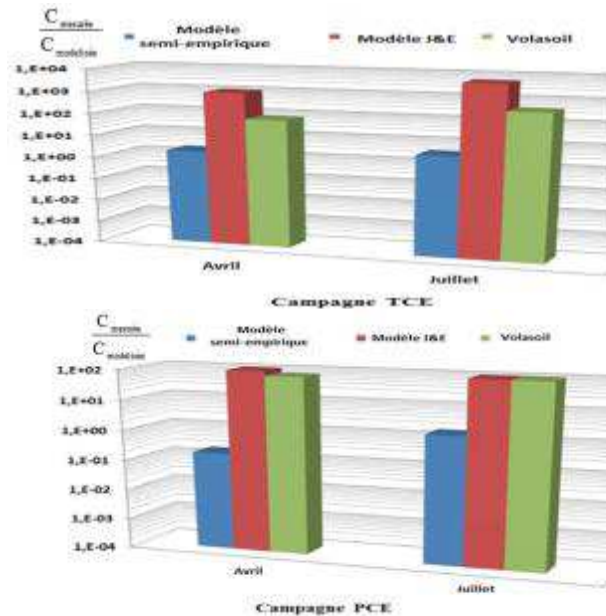


Figure 6 : Comparaison des rapports entre concentration intérieure mesurée et calculée pour trois différents modèles (base Hulot et al. 2005)

Au vu des améliorations apportées par les lois semi-empiriques développées, celles-ci pourraient être utilisées de la même manière que les modèles analytiques existants pour l'évaluation des risques sanitaires liés aux polluants gazeux du sol et la gestion des sols pollués. L'intérêt est également de pouvoir les intégrer dans un modèle aérodynamique du bâtiment afin d'étudier la qualité de l'air intérieur en fonction de l'ensemble des caractéristiques du bâtiment et des variations météorologiques.

## 1.2 INTÉGRATION DES MODÈLES ANALYTIQUES DANS UN MODÈLE NUMÉRIQUE AÉRAULIQUE DU BÂTIMENT

Les modèles développés, relatifs à l'évaluation des débits d'air venant du sol ainsi qu'aux débits de polluants venant du sol, ont été intégrés dans un code de simulation thermo-aérodynamique multizone. Cette intégration s'est faite simplement en supposant le flux d'air ou de polluant venant du sol comme un terme source dans l'équation de la conservation de la masse.

La figure 7 montre les résultats obtenus en termes d'évolution de la concentration intérieure en polluants pour l'exemple d'entrée du radon (Rn), lorsque l'on associe les lois semi-empiriques de polluants intégrant le couplage convectif-diffusif. Les calculs sont

effectués, toute chose égale par ailleurs, pour les trois typologies de soubassement (vide sanitaire, dalle portée, dallage indépendant).

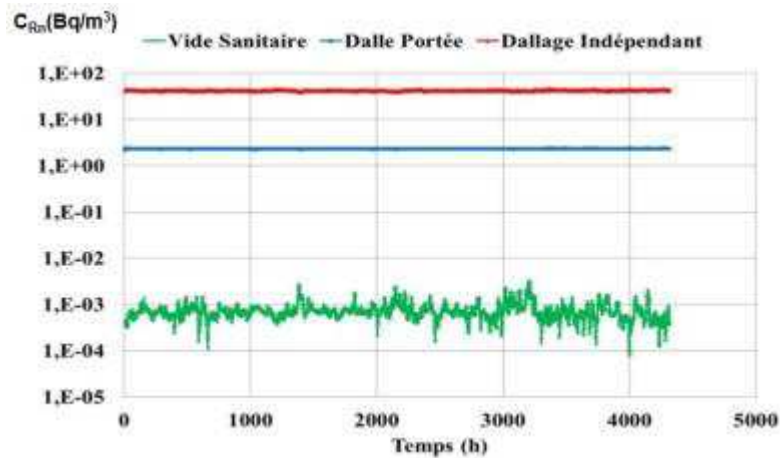


Figure 7 : Evolution de la concentration intérieure en polluants venant du sol (exemple d'entrée du radon-Rn), pour les trois typologies de soubassement

Cette intégration a montré que, comparativement à une dalle portée, le dallage indépendant favorise l'entrée des polluants dans les bâtiments à cause de la présence de la fissure périphérique. La présence d'un vide sanitaire limite significativement l'entrée des polluants gazeux du sol dans le bâtiment car celui-ci constitue une zone de dilution efficace.

Cette illustration montre la robustesse des modèles semi-empiriques développés qui peuvent être intégrés dans un code de ventilation pour évaluer la qualité de l'air intérieur liée ces pollutions gazeuses.

### 1.3 PERSPECTIVE POUR LES MODÈLES D'ÉVALUATION DES RISQUES

#### Objectifs et résultats obtenus

Ces travaux visaient à améliorer les modèles analytiques de transfert des polluants gazeux du sol dans les bâtiments servant à l'évaluation de la qualité de l'air intérieur. Premièrement, l'amélioration des modèles analytiques a consisté à mieux considérer la prise en compte du transport convectif et diffusif des polluants auprès des fondations.

Cela s'est tout d'abord concrétisé par le développement de modèles analytiques de débits d'air dus à la convection pour les typologies de soubassement les plus fréquentes : dalle portée, dallage indépendant, vide sanitaire. Ces modèles tiennent compte aussi des bâtiments avec des murs enterrés et d'un éventuel lit de gravier sous les fondations. Cette contribution a ainsi permis d'amener une meilleure exhaustivité du traitement des typologies qui est l'une des limites des modèles actuels. Les études de sensibilité réalisées sur la base de l'utilisation de ces modèles (débits d'air analytiques) ont montré que :

- Le débit d'air du sol entrant dans un bâtiment dépend fortement de la typologie du soubassement ;
- La présence d'un lit de gravier sous le plancher bas peut augmenter les débits d'air entrant dans le bâtiment pour un dallage indépendant ;



- Le débit d'air passant par les murs enterrés des bâtiments n'est pas systématiquement négligeable, il peut être important selon la perméabilité et la profondeur du mur enterré ;
- La zone d'influence de la convection auprès des fondations est globalement située à une profondeur égale à la moitié de la largeur du bâtiment et sur la surface du sol à cette même distance des fondations.

Les confrontations numériques et expérimentales réalisées ont donné des résultats satisfaisants et ont permis de conforter la qualité et la pertinence des développements réalisés. La confrontation des débits d'air analytiques calculés avec notre modèle, d'une part avec ceux de la littérature et d'autre part, avec la valeur par défaut fixée par l'EPA, a ainsi montré l'incertitude que l'on peut générer en négligeant les spécificités du soubassement dans l'estimation des débits d'air venant du sol et entrant dans le bâtiment.

Cependant, si l'on souhaite utiliser directement ces modèles, une incertitude demeure quant à la concentration en polluant contenue dans le sol à leur associer, que ce soit pour une utilisation dans les modèles d'évaluation existant ou pour l'intégrer dans des modèles aérauliques. En effet, le transport diffusif n'y est pas pris en compte alors qu'il peut influencer sur le transport.

Deuxièmement, l'amélioration des modèles a également consisté à mieux traiter la prise en compte du transport couplé par convection et diffusion dans la zone d'influence de la convection sous le bâtiment. L'analyse critique des modèles actuels a montré qu'ils ne tiennent pas bien compte des phénomènes en jeu, notamment l'importance relative de la convection et de la diffusion. La modélisation analytique de ces phénomènes est complexe et le plus souvent impossible directement. Afin de pouvoir les prendre en compte, notre démarche a consisté :

- dans un premier temps à réaliser des expérimentations numériques à l'aide d'un modèle CFD afin de mieux comprendre l'influence relative des phénomènes de convection et de diffusion à l'interface sol/bâtiment ;
- dans un deuxième temps, et sur la base de ces résultats, des modèles semi-empiriques ont été développés pour estimer les flux d'entrée de polluants en fonction des paramètres du sol et pour différentes typologies de soubassement, en intégrant notamment dans ces modèles, les lois analytiques de débits d'air déjà définies, en fonction du régime d'écoulement considéré entre le sol et le bâtiment.

L'étude sur l'influence relative des phénomènes de convection et diffusion a montré que :

- Globalement, le phénomène de transfert est mixte, convectif et diffusif ;
- Pour des sols relativement imperméables, le flux de polluant diffusif est dominant ;
- Pour des sols de perméabilité plus élevée, le flux de polluant est mixte (diffusif et convectif). Le flux convectif favorise la concentration du polluant sous le bâtiment et exacerbe ainsi le flux diffusif ;
- Pour des perméabilités de sols très élevées, et en fonction de la typologie de soubassement considérée, la convection peut devenir majoritaire, notamment pour des dallages sur terre-plein.

Les premières confrontations de ces lois semi-empiriques réalisées avec des modèles existants (Johnson et Ettinger, Volasoil) et certaines expérimentations disponibles, ont globalement donné satisfaction sur le fait que les lois semi-empiriques développées améliorent l'évaluation des concentrations intérieures liées aux polluants gazeux du sol et donnent le même ordre de grandeur que les mesures.

Troisièmement, ces lois semi-empiriques ont été intégrées dans un code thermo-aéraulique multizone pour étudier l'impact du transfert des polluants du sol sur la qualité de l'air intérieur. Cette étude a montré que la concentration intérieure résultante dépend fortement de la typologie du soubassement. Cette intégration a aussi démontré la robustesse des lois développées et leur facilité d'utilisation pour être associées à un code de ventilation.

### **Perspectives**

De nouvelles confrontations expérimentales devraient être conduites afin d'avoir une plus grande exhaustivité de situations comparées et d'asseoir la pertinence des lois semi-empiriques développées.

Par ailleurs, les lois semi-empiriques d'estimation de flux de polluant entrant dans le bâtiment ont été établies en supposant que le polluant est situé tout droit au-dessous du bâtiment. Aussi, en fonction des résultats d'une confrontation plus exhaustive entre les lois semi empiriques développées et des cas expérimentaux ou *in situ*, s'il s'avère que ces modèles restent trop imprécis, des voies d'amélioration sont possibles comme :

- tenir compte d'une source de polluant latérale au bâtiment ;
- prendre en compte la biodégradation de certains polluants.

La prise compte de ces aspects permettrait d'améliorer la précision de ces modèles et/ou d'étendre leur domaine d'application en fonction des situations rencontrées.

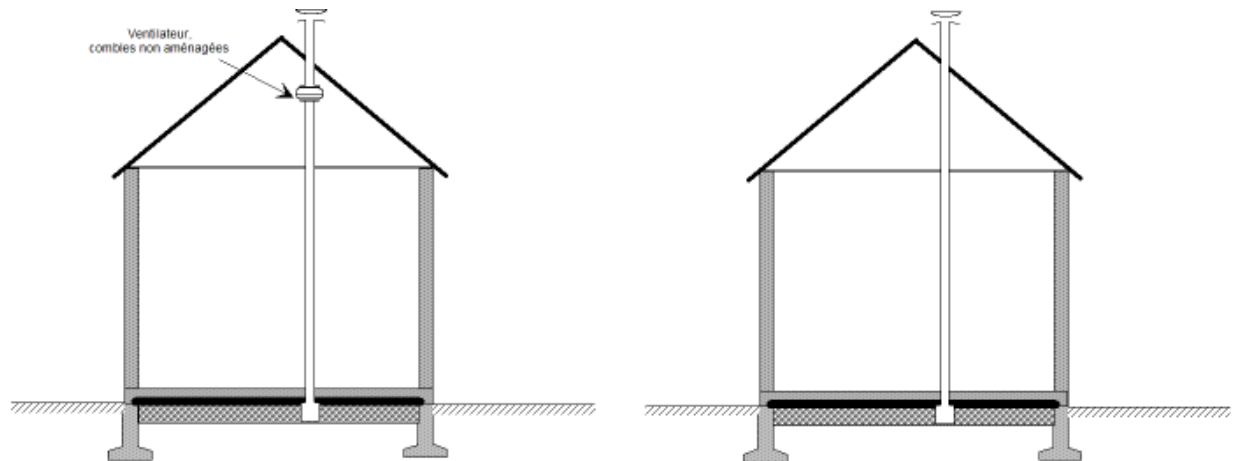
La méthode d'estimation de la perméabilité « équivalente » du plancher bas d'un bâtiment, établie dans cette étude pourrait être testée sur des cas réels afin de valider la pertinence de l'approche proposée, notamment au regard des valeurs par défaut proposées par l'EPA.

Par ailleurs, dans les milieux poreux, il n'existe pas de corrélation claire entre la perméabilité à l'air et le coefficient de diffusion d'un polluant. De fait, dans les modélisations, on considère en général un coefficient de diffusion invariable quelle que soit la perméabilité à l'air du sol considérée. La variabilité présumée du coefficient de diffusion en fonction de la perméabilité à l'air du sol pourrait cependant avoir un impact sur le transport de polluant résultant. Des travaux exploratoires seraient nécessaires afin d'étudier ces liens entre paramètres. Ce type de corrélation peut ensuite être intégré dans les lois semi-empiriques développées.

## 2. DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE DIMENSIONNEMENT DE SYSTÈME DE DÉPRESSURISATION DES SOLS PASSIF

Le deuxième objectif visé par la recherche était le développement d'un modèle de dimensionnement permettant de caractériser les conditions de fonctionnement mécanique d'un système de dépressurisation du sol passif servant à protéger les bâtiments des transferts gazeux selon leurs contextes et environnements (implantation des bâtiments - tirage thermique, effet du vent - et du système de ventilation des bâtiments).

Les systèmes de dépressurisation du sol (SDS) ont été développés pour réduire les risques liés aux transferts de polluants issus du sol. Le principe de ces systèmes consiste à connecter de façon aéraulique le soubassement du bâtiment à l'extérieur afin de pouvoir extraire mécaniquement ou naturellement un débit d'air induisant une légère dépression sous le bâtiment et bloquant ainsi une grande partie des flux de polluants venant du sol (figure 8).



(a) Système actif avec ventilateur d'extraction (b) Système passif sans ventilateur d'extraction  
Figure 8 : principe du Système de Dépressurisation des Sols (SDS)

À notre connaissance, à ce jour il n'existe pas de modèle de dimensionnement des SDS, notamment pour des systèmes passifs, tenant compte d'une météorologie locale, des caractéristiques du bâtiment et de son environnement. La pratique a montré que certains SDS installés sont sous-dimensionnés et par conséquent ne parviennent pas à réduire efficacement la concentration des gaz du sol dans les bâtiments. Parfois les systèmes sont surdimensionnés, dans ce cas ils augmentent la consommation énergétique (dans le cas d'un extracteur mécanique) (Reddy et al, 1988). Pour éviter les mauvaises pratiques qui nuisent à l'efficacité de ces systèmes, il ressort une nécessité de développement d'un outil de dimensionnement qui pourrait, à terme, servir aux professionnels et aux bureaux d'études.

Ce chapitre se décline en trois parties :

- Premièrement, le développement du modèle aéraulique de caractérisation des conditions de fonctionnement des SDS selon les contextes et environnements (implantation des bâtiments - tirage thermique, effet du vent - et du système de ventilation des bâtiments) a été réalisé ;
- Deuxièmement, les résultats de ce modèle ont été confrontés à des résultats expérimentaux déjà obtenus pour caractériser la performance d'un SDS naturel dans l'étude d'Abdelouhab (Abdelouhab, 2011). Des études de sensibilité ont également été conduites ;
- Troisièmement, un modèle simplifié de SDS tenant compte de caractéristiques du bâtiment réduites (hauteur du bâtiment, diamètres du conduit d'extraction) est présenté afin de tester l'aptitude mécanique du système à fonctionner dans un

environnement donné et en fonction des caractéristiques d'intérêt (perméabilité du sol, météorologie locale...).

## 2.1 MODÈLE DE SDS PASSIF

Le système de dépressurisation du sol en fonctionnement naturel a été modélisé pour deux typologies de soubassement : la dalle portée et le dallage indépendant. Le lit de gravier sous les planchers bas est pris en compte pour chacune de ces typologies.

Les modèles développés tiennent compte de tous les composants d'un SDS :

- le puisard ;
- le conduit ;
- et l'extracteur (actif ou passif).

Ils peuvent tenir compte aussi de l'interaction du SDS avec le bâtiment et ses environnements intérieur et extérieur. Ces modèles peuvent tenir compte aussi d'un éventuel transport convectif et diffusif du polluant dans le bâtiment lorsque le SDS est en fonctionnement.

Les hypothèses de modélisation tiennent compte d'une analogie thermique/aéroulque comme dans le chapitre précédent pour les écoulements dans les milieux poreux. L'écoulement est régi par la loi de Darcy dans ces milieux, excepté dans le lit de gravier où ce dernier est régi par la loi de Darcy-Forcheimer. Le calcul s'effectue de la manière décrite ci-après. On détermine deux expressions pour le débit extrait par le SDS. La première correspond à la somme des débits venant d'une part du sol et d'autre part de l'intérieur du bâtiment. Ils sont déterminés par une loi analytique obtenue de façon analogue à celles réalisée dans la première partie de cette étude. La deuxième expression correspondant au débit traversant le conduit du SDS est obtenue par les lois classique de pertes de charge aéroulque.

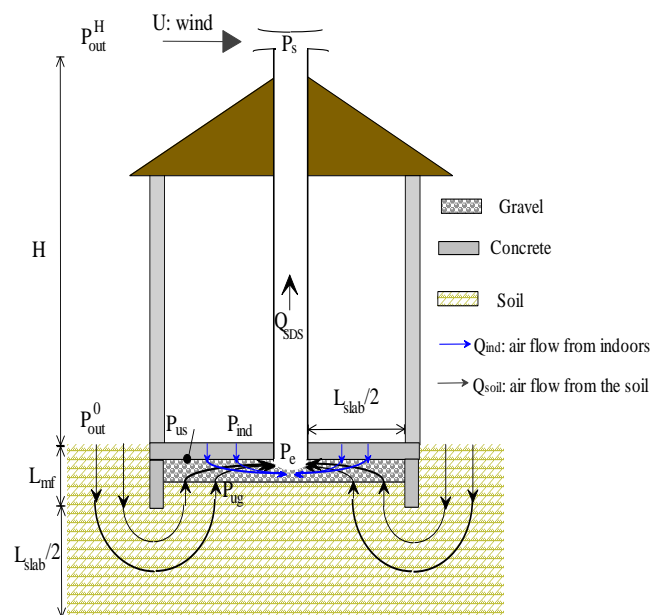


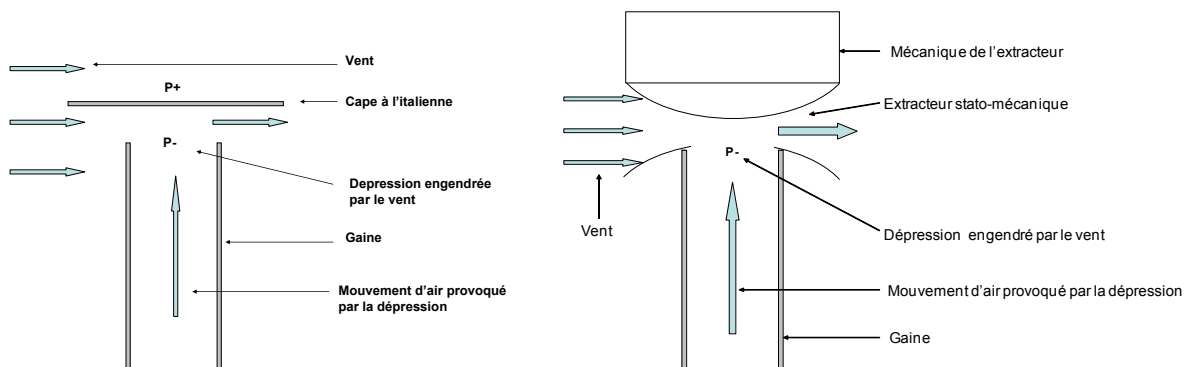
Figure 9 : Schéma de principe de la modélisation du SDS et de son couplage avec un modèle aéroulque du bâtiment

On réalise ensuite la conservation de la masse à l'entrée du conduit en égalisant ces deux expressions. On obtient ainsi une équation dont l'inconnue est la pression au niveau de l'entrée du conduit, en fonction de l'ensemble des paramètres du problème, dont la pression intérieure du bâtiment et la pression extérieure. Lorsque cette équation est couplée à un modèle aérodynamique du bâtiment, on peut ainsi calculer à chaque pas de temps le fonctionnement mécanique du SDS passif, à savoir le débit extrait du SDS et le niveau de pression généré dans le lit de gravier.

## 2.2 CONFRONTATION EXPÉRIMENTALE ET ÉTUDE DE SENSIBILITÉ

Les modèles ont été validés expérimentalement pour deux types d'extracteur naturels (figure 10) :

- un extracteur à la cape à l'italienne ;
- et un extracteur stato-mécanique à fonctionnement statique.



(a) Extracteur classique ou « cape à l'italienne » (b) extracteur stato-mécanique  
Figure 10 : Principes et photos d'extracteurs

L'intérêt de l'extracteur stato-mécanique est, en présence de vent, d'optimiser l'écoulement de l'air à travers l'extracteur, facilitant ainsi l'extraction d'air du conduit par une accentuation de la dépression en bout de conduit.

Cette confrontation des modèles avec les résultats expérimentaux a été satisfaisante, parce qu'elle démontre que le modèle développé peut donner le même ordre de grandeur que la réalité.

L'une des forces de ces modèles est qu'ils peuvent être facilement intégrés dans n'importe quel code de ventilation pour étudier la performance de ce type de système. La figure 11 montre le type de résultat pouvant être obtenu avec ce modèle, à savoir le

pourcentage de fonctionnement mensuel au-dessus de certaines valeurs seuils de dépression dans le lit de gravier.

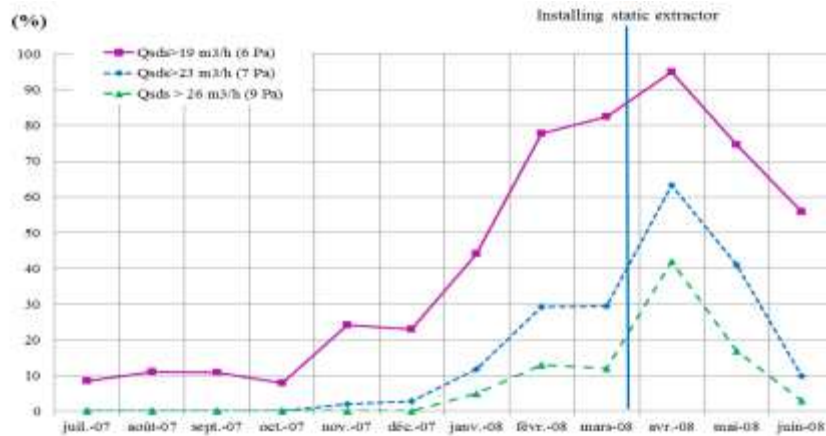


Figure 11 : Pourcentage de fonctionnement mensuel du SDS au-dessus de certaines valeurs de dépression dans le lit de gravier

L'étude de sensibilité sur les débits d'air extraits par le modèle SDS a montré que la perméabilité du sol, la perméabilité du plancher bas et le coefficient de dépression de l'extracteur naturel peuvent affecter la performance aéraulique du SDS. On s'aperçoit notamment que lorsque le plancher bas est très étanche, le débit d'air venant de l'environnement intérieur vers le lit de gravier devient très faible et que le débit résiduel entrant dans le SDS vient essentiellement du sol.

Par ailleurs, une première application des modèles a permis d'étudier l'impact de la météorologie sur le fonctionnement du SDS naturel. Cette étude a confirmé que la performance du SDS naturel est très liée à son lieu d'implantation, c'est-à-dire aux forces naturelles, le vent et le tirage thermique.

A partir d'un développement supplémentaire permettant d'intégrer un flux diffusif de polluant dans la modélisation du SDS, une seconde étude illustrative utilisant le modèle développé, a montré que même si le SDS bloque le flux convectif de polluant vers l'intérieur du bâtiment, un flux diffusif pouvait entrer et ainsi atténuer l'efficacité du SDS. L'une des forces des modèles développés est de pouvoir considérer l'entrée du polluant par l'association du flux convectif et du flux diffusif quand le SDS est en fonctionnement.

Enfin, une troisième application des modèles a porté sur l'impact des systèmes de ventilation sur le fonctionnement du SDS naturel. Quatre systèmes de ventilation en fonctionnement avec le SDS ont été modélisés :

- la ventilation naturelle ;
- la ventilation mécanique par extraction ;
- la ventilation mécanique par insufflation ;
- et la ventilation mécanique double flux.

Cette étude a permis de montrer que les systèmes de ventilation par insufflation et le système de ventilation double flux sont les systèmes optimaux pour le bon fonctionnement du SDS naturel. Le système de ventilation par insufflation met le bâtiment en surpression et inverse les flux de polluants vers l'intérieur du bâtiment et ainsi favorise le bon fonctionnement du SDS naturel. La ventilation double flux, quant à elle, met en équilibre le bâtiment et donc n'entrave pas le bon fonctionnement du SDS naturel. La ventilation naturelle du bâtiment n'entrave pas non plus le bon fonctionnement du SDS. Enfin, le système de ventilation par extraction ressort comme le

moins optimal parce qu'il exacerbe la dépression du bâtiment et favorise par conséquent l'entrée de polluants gazeux du sol dans le bâtiment.

### 2.3 DÉVELOPPEMENT D'UN PROTOTYPE D'OUTIL DE DIMENSIONNEMENT

En faisant des hypothèses supplémentaires, à savoir que l'on considère que le plancher bas est étanche à l'air, on évite l'interaction aéraulique entre le fonctionnement du SDS et l'ambiance intérieure du bâtiment. Cette situation, considérée comme idéale peut correspondre au cas d'un bâtiment neuf ayant une excellente étanchéité à l'air du plancher bas. On peut ainsi développer un modèle simplifié de SDS en tenant compte de caractéristiques du bâtiment réduites (hauteur du bâtiment, diamètres du conduit d'extraction). Cela permet de conduire des études de sensibilité en fonction des autres paramètres du problème et notamment de la perméabilité du sol mais aussi de la météorologie locale, afin de tester l'aptitude mécanique du système à fonctionner dans un environnement donné selon des caractéristiques d'intérêt.

Les figures 12 et 13 montrent un prototype de cet outil réalisé sous l'environnement Excel.



Figure 12 : Interface du prototype réalisé



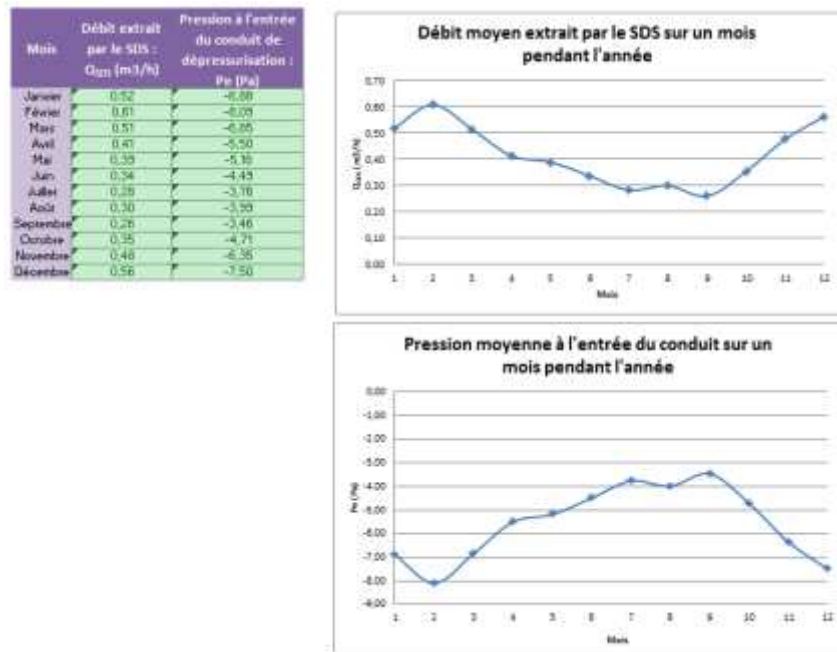


Figure 13 : Résultats présentés

Ainsi, en fonction de l'ensemble des paramètres liés au bâtiment et à son environnement, on obtient comme résultat le fonctionnement mécanique du SDS, à savoir le débit extrait et la dépression générée dans le lit de gravier, pour des conditions stationnaires (un point de température extérieure et de vent) ou pour des conditions instationnaires (fichier météorologique sur une période donnée).

Ce modèle simplifié permet ainsi de tester l'aptitude du SDS passif à fonctionner dans un environnement donné. Des limites sont néanmoins atteintes pour évaluer son fonctionnement plus réaliste dès que le plancher bas n'est plus étanche à l'air. Par ailleurs, on a également observé des variations de comportement du SDS dans ce cas, en fonction du type de système de ventilation et en utilisant le modèle plus complet, comme l'ont montré les résultats obtenus et synthétisés dans ce document.

## 2.4 RÉSULTATS OBTENUS ET PERSPECTIVES :

### Objectifs et résultats obtenus

Le second objectif de ces travaux était le développement d'un outil de dimensionnement d'un système de dépressurisation du sol passif afin de réduire le flux d'entrée des polluants dans le bâtiment. Le modèle a notamment été développé en se fondant sur les travaux précédents afin de pouvoir évaluer analytiquement les débits d'air entrant dans le système et traversant les différents milieux considérés. Il a ensuite été couplé à un modèle aérodynamique du bâtiment afin de pouvoir étudier son fonctionnement mécanique tout au long de l'année. Il a ensuite été confronté à des résultats expérimentaux obtenus dans la maison expérimentale Maria du CSTB. Sur cette base, la contribution a consisté à proposer un modèle de dimensionnement du SDS à la fois passif et actif. Le modèle a été utilisé pour réaliser de premières études de sensibilité, notamment sur l'impact de la météorologie sur le fonctionnement du SDS, l'impact de l'éventuel flux diffusif qui pourrait entrer dans le bâtiment quand le SDS est en fonctionnement et finalement l'influence des systèmes de ventilation sur le fonctionnement du SDS.



Ces études illustratives ont montré que :

- le fonctionnement du SDS dépend du site d'implantation car il est très lié aux forces naturelles : le vent et le tirage thermique ;
- le fonctionnement du SDS dépend aussi de la saison (été, hiver), celui-ci étant généralement plus efficace en hiver à cause du tirage thermique plus important ;
- la hauteur du bâtiment et le diamètre du conduit de l'extraction du SDS jouent un rôle dans l'efficacité du système ;
- quand le SDS est en fonctionnement, un flux diffusif peut encore entrer dans le bâtiment ;
- le système de ventilation du bâtiment peut affecter le fonctionnement du SDS, notamment en présence d'un plancher bas plutôt perméable à l'air.

En faisant des hypothèses supplémentaires, à savoir que l'on considère que le plancher bas est étanche à l'air, un outil plus opérationnel de dimensionnement de SDS passif dans un environnement plus attractif (par exemple Excel) a été développé. Il permet de conduire des études de sensibilité en fonction des paramètres majeurs du problème comme la perméabilité du sol mais aussi en fonction d'une météorologie locale, afin de tester l'aptitude mécanique du système à fonctionner dans un environnement donné et selon des caractéristiques d'intérêt (hauteur du bâtiment, diamètre du conduit d'extraction).

### **Perspectives**

Cette étude a permis d'obtenir un modèle numérique couplant le fonctionnement d'un système de dépressurisation des sols au régime de ventilation d'un bâtiment avec une précision satisfaisante au regard de la comparaison réalisée sur la base de résultats expérimentaux. A partir de ce modèle, un modèle simplifié a été réalisé, s'affranchissant de l'interaction avec l'aérodynamique du bâtiment en supposant le plancher bas de ce dernier étanche à l'air. Ce modèle simplifié pourrait s'avérer intéressant pour une utilisation de pré dimensionnement de tels systèmes par les acteurs du bâtiment (bureaux d'études, architectes) pour des conditions environnementales données. Néanmoins, les limites d'utilisation et la pertinence du modèle simplifié sont mal cernées et devraient être approfondies, notamment par comparaison avec le modèle numérique plus complet avant de pouvoir mettre à disposition des professionnels un utilitaire exploitable, issu de ce modèle simplifié.

Une fois ce travail réalisé, un utilitaire pourrait être développé pour une utilisation par les professionnels.

### **3. PUBLICATIONS**

#### **Thèse soutenue**

Impact des polluants gazeux du sol sur la qualité de l'air intérieur des bâtiments. Thèse de l'université de La Rochelle, présentée par Thierno Mamadou Oury DIALLO le 10 octobre 2013 pour obtenir le grade de Docteur, spécialité : génie civil.

#### **Journaux scientifiques**

- Analytical quantification of air flows entering through building substructures for the assessment of soil gas pollutant impact on indoor air quality. Diallo T. M. O., Collignan B., Allard F., Building Simulation, 6/1, March 2013, p. 81-94 [doi:10.1007/s12273-012-0095-2]
- Radon remediation and prevention status in 23 European countries. Holmgren O., Arvela H., Collignan B., Jiranek M., Ringer W., Radiation Protection Dosimetry 157/3, June 2013, p. 392-396 [doi: 10.1093/rpd/nct156]
- Development of a methodology to characterize radon entry into dwellings. Collignan B., Lorkowski C., Améon R., Building and Environment, 57, November 2012, p. 176 - 183

#### **Conférences internationales**

- Air flow model for sub-slab depressurization systems design. T.M.O. Diallo, B. Collignan, F. Allard., 34th Conference on Air Infiltration and Ventilation Centre. 25-26 September 2013, Athens, Greece.
- Development of an air flow model for passive Soil Depressurization System design to protect building against radon. T.M.O. Diallo, B. Collignan, F. Allard. 7th International Conference on Protection Against Radon at Home and at Work. 2nd - 6th Sept. 2013. Prague. Czech Republic.
- Analytical quantification of airflow through permeable basement wall. T.M.O. Diallo, B. Collignan, F. Allard. Vapor Intrusion conference 2012 3-4 Octobre 2012, Denver, Colorado, USA
- Contamination of indoor air by soil gas pollutants: the impact of building substructures. T.M.O. Diallo, B. Collignan, F. Allard, J. Koffi. 10th International Conference on Industrial Ventilation, Ventilation 2012, 17-19 September 2012, Paris, France
- Impact assessment of soil gas pollutant on indoor air quality: Development of analytical models to quantify air flow entering through building substructures. T.M.O. Diallo, B. Collignan, F. Allard. Healthy Buildings 2012, 10th International conference, July 8-12, 2012, Brisbane, Australia.
- The Effect of New Building Concepts on Indoor Radon. W. Ringer, J. Gräser, H. Arvela, O. Holmgren, B. Collignan. IRPA 13, Glasgow, Scotland, 13 - 18 May 2012
- Radon prevention and remediation in EU countries, RADPAR questionnaire study. O. Holmgren, H. Arvela, B. Collignan, M. Jiranek, W. Ringer. IRPA 13, Glasgow, Scotland, 13 - 18 May 2012

## **LISTE DES RÉFÉRENCES**

- Abdelouhab M., Collignan B., Allard F. (2010). Analytical and Numerical quantification of air flows through the ground to study the impact of gaseous soil pollutants on Indoor Air, first results. Clima2010-10th REHVA, Antalya-Turquie.
- Abdelouhab M., Collignan B. and Allard F. (2010). Experimental study on passive Soil Depressurization System to prevent soil gaseous pollutants into building. *Building and Environment*, 45, 2400-2406.
- Abdelouhab M. (2011). Contribution à l'étude du transfert des polluants gazeux entre le sol et les environnements intérieurs des bâtiments. Thèse Université La Rochelle. tel-00683739.
- Abreu L. D. and Johnson P. C. (2005). Effect of vapor source-building separation and building construction on soil vapor intrusion as studied with a three- dimensional numerical model. *Environ. Sci. Technol.* 39: 4550-4561.
- Abreu L.D. and Johnson P.C. (2006). Simulating the Effect of Aerobic Biodegradation on Soil Vapor Intrusion into Buildings: Influence of Degradation Rate, Source Concentrations. *Environmental Science and Technology*, 40, 2304-2315.
- Allard F. and Utsumi Y. (1992). Airflow through large openings. *Energy and Buildings*, 18 (1992) 133-145.
- Allard F. (1998). Natural ventilation in buildings. James & James, London. 356 p.
- Allard F. and Rodriguez E. A. (1992). Coupling COMIS airflow model with other transfer phenomena. *Energy and Buildings*, 18 (1992) 147-157.
- Aldenkamp F.J. and Stoop P. (1994). Sources and transport of indoor radon: measurements and mechanisms. Rijksuniversiteit Groningen.
- Angell W.J. (2012). Radon Control in new homes: a meta-analysis of 25 years of research. aarst proceedings 2012.
- Adomait M. (1992). Soil gas containing VOCs Entering Homes near Hazardous Lands. Canadian Mortgage and Housing Corporation.
- Andersen C.E. (1992). Entry of soil gas and radon entry into houses. Thesis Technical University of Denmark.
- Andersen C.E. (2001). Numerical modeling of radon-222 entry into houses: an outline of techniques and results. *The Science of the Total Environment.*; 272(1-3):33-42.
- Arvela H. (2001). Experiences in radon-safe building in Finland. *The Science of the total Environment*, 272 (1-3), 169-17.
- ASTM (2008). Designation: E 1465-08, Standard Practice for Radon Control Options for the Design and Construction of New Low-Rise Residential Buildings. ASTM International
- Atteia O. (2005). Chimie et pollutions des eaux souterraines. Tec & Doc Lavoisier, p. 398. (ISBN: 2743007613).
- Awbi H.B., 2003. Ventilation of buildings. Second edition, Taylor and Francis (E&FN spon), 522 p.
- Baker P.H., Sharples S., Ward I.E (1987). Air flow through cracks *Building and Environment*1987; 22:.293-304.
- 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.

- Bazant Z. P., Sener S., Kim J. K. (1987). Effect of cracking on drying permeability and diffusivity of concrete. *ACI Materials Journal*, vol. 84, pp. 351-357, 1987.
- Boussa O. (2000). Structures en béton soumises à des sollicitations thermomécaniques sévères : évolution des dommages et des perméabilités. Thèse LMT Cachan.
- Bonnefous Y.(1992). Étude numérique des systèmes de ventilation du sol pour diminuer la concentration en radon dans l'habitat. Thèse de doctorat en Génie Civil : sols, matériaux, Structures et Physique du bâtiment, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 256 p.
- Bonnefous Y., Gadgil A. 1., Fisk W.J., Prill R.I., Nematollahi A.(1992) Field Study & Numerical simulation of subslab ventilation systems. *Environ. Sci. & Techno.* 1992 ; 26: 1752-1759.
- Bozkurt O. (2003). Investigation of Vapor Intrusion Scenarios Using a 3-D Numerical Model; Thesis Brown University.
- Bozkurt O., Pennell K.G., Suuberg E.M (2009). Evaluation of the Vapor Intrusion Process for Non-Homogeneous Soils. *Journal of Ground Water Monitoring & Remediation*, 2009, 29(1), 92-104.
- Brinkman H.C. (1947). A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm particles, *App.Sci. Res., Sect. A* 1, 27.
- Brunt D. (1952). *Physical and Dynamical Meteorology*. Cambridge University Press, Cambridge, 2nd edition, p. 114.
- Carman, P.C. (1937). Fluid flow through granular beds, *Transactions of the Institute of Chemical Engineering* (1937) 15:150–66.
- Carman P.C.(1939). Permeability of saturated sands, soils and clays. *J. Agric. Sci.* 29(2):262–273 75.
- CCSN (2012) (Commission canadienne de sûreté nucléaire), le radon et la santé, Info-0813.
- Choi J.W. and Smith J.A. (2005). Geoenvironmental factors affecting organic vapor advection and diffusion fluxes from the unsaturated zone to the atmosphere under natural conditions. *Environ. Eng. Sci.* 22, 95-108.
- Collignan B. (2008). Le radon dans les bâtiments : guide pour la remédiation dans les constructions existantes et la prévention dans les constructions neuves, Guide technique, ed. CSTB.
- Collignan B. and Millet J.R. (1999). Estimation of Radon Concentration in House Using a Simple Ventilation Model." *Radon in the living environment*. 19-23 April 1999 Athens workshop, Greece.
- Comsol Mutiphysics [www.comsol.com/](http://www.comsol.com/).
- Crawford Brown D.J. and Michel J. (1987) Measurement in environmental radon. *Environmental Science research*, 35, p59-80. Plenum Press.
- Cripps A.J. (1998). Air Modeling and measurement of soil gas flow. AIVC 11619, Construction Research communication Ltd.
- Danyushevky V.S. and Djabarov K.A. (1973). Interaction between pore structure and properties of hydrated cement pastes. *International RILEM Symposium on pore Structure and properties of materials*, Prague, Czecholovaskia, 1973, p. D97-D114.
- Darcy H.(1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*, Delmont, Paris, 1856.

Dridi L. and Schäfer G. (2006). Quantification du flux de vapeurs de solvants chlorés depuis une source en aquifère poreux vers l'atmosphère : Biais relatifs à la non uniformité de la teneur en eau et à la non stationnarité du transfert. C.R. Mécanique 334, 611-620.

Danyushevky V.S. et Djabarov K.A. (1973), Interaction between pore structure and properties of hydrated cement pastes, International RILEM Symposium on pore Structure and properties of materials, Prague, Czecholovaskia, 1973, p.D97-D114.

Déniaré E. (2003). Application of in situ quality control of cover concrete, MCS. Institut of structures (IS).

DeVaull G.E. (2010). Vapor intrusion from subsurface to Indoor Air: Biodegradable Petroleum Vapors versus Recalcitrant Chemicals. Air and Waste Management Association (A&WMA) Specialty Conference 2010, Chicago, Illinois September 29-30, 2010.

Diallo T.M.O., Collignan B., Allard F. (2013), Analytical quantification of airflows from soil through building substructures Building Simulation Journal. Volume 6, Issue 1, pp 81-94.

Diallo T.M.O., Collignan B., Allard F. (2012) Contamination of indoor air by soil gas pollutants: the impact of building substructures. Conférence Ventilation 2012:17, 18,19, Septembre 2012 Paris.

Directive 1999/13/CE relative à la réduction des émissions des composés organiques volatils dues à l'utilisation de solvants organiques dans certaines activités et installations, 11 mars 1999.

Elenbaas W. (1942). Heat Dissipation of Parallel Plates by Free Convection," *Physica*, Vol. IX, No. 1, p. 1-28.

Faucher B. (1991). Analyse proplastique des barrages en béton et de leurs fondations. Rôle de la pression interstielle. Thèse, ENPC, Paris.

Fay, J. E., Tekverk, R., Gerard, T. J. (1994). Washington State passive stack study; Fay, J. E., Tekverk, R., Gerard, T. J., Eds.; Environmental Protection Agency: Research Triangle Park, NC, 1994; Vol. V, p. 4.1-4.10.

Fen C.-S (2006). Effective gas-phase diffusion coefficient in soils. *Brownfields III: Prevention, Assessment, Rehabilitation and Development of Brownfield Sites*. WIT Transactions on Ecology and the Environment Volume: 94 (ISBN: 978-1-84564-041-5).

Feustel H. (1990). Fundamentals of the multizone air flow model- COMIS. Technical note AIVC 29. Air Infiltration and Ventilation.

Forchheimer (1901). P.H. Z. Ver. Dtsch. Ing. 1901; 45: 1782-1788.

Ficher M. L. , Bentley A. J., Dunkin K. A., Hodgson, A. T., Nazaroff W. W., Sextro R. G., Daisey J. M.(1996). Factors affecting indoor air concentrations of volatile organic compounds at a site of subsurface gasoline contamination. *Environ. Sci. Technol.* 1996, 30 (10), 2948-2957.

Fisk, W.J., Modera, M.P., Sextro, R.G., Garbesi, K., Wollenberg, H.A., Narasimhan, T.N., Nuzum, T., Tsang, Y.W.(1992). Radon entry into basements: approach, experimental structures, and instrumentation of the small structures project. LBLÐ31864, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA.

FDCA. Department of Community Affairs Radon Program (1996). Florida Standard for Radon-Resistant New Commercial Building Construction, 1996, January 23.

Gadgil A.J. (1992). Models of Radon Entry, *Radiat. Prot. Dosimetry* 45(1-4): 373-379.

Gadgil A.J., Bonnefous Y., Fisk W.J. (1992). Relative effectiveness of Sub-Slab Pressurization and Depressurization Systems for Indoor Radon Mitigation: Studies with

an Experimentally Verified Numerical Model. In: Proceedings of the 1992 international symposium on Radon.

Garbesi K. and Sextro R.G. (1989). Modeling and field evidence of pressure-driven entry of soil gas into a house through permeable below-grade walls. *Environ. Sci. Technol.*, 23 (12), 1481-1487.

Garbesi K., Sextro R. G., Fisk W. J., Modera M. P., Revzan K. L.(1993). Soil-gas entry into an experimental basement - model measurement comparisons and seasonal effects. *Environ. Sci. Technol.* 1993, 27, (3), 466-473.

Gräf H. and Grube H. (1986). Verfahren zur Prüfung der Durchlässigkeit von Mörtel und Beton gegenüber Gasen und Wasser, *Beton* 36 (5):184-187, (6), 222-226.

Grasberger S. and Meschke G. (2000). A hygro-thermal-poroelastic damage model for durability analyses of concrete structures. Proceedings ECCOMAS, Barcelona, 11-14 September, 2000.

Grathwohl P. (1998). Diffusion in Natural Porous Media: Contaminant Transport, Sorption/Desorption and Dissolution Kinetics. Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London.

Greenbaum A. (1997). Iterative Methods for Linear Systems *Frontiers in Applied Mathematics*, vol. 17, SIAM, 1997.

Greiner U. and Ramm W. (1993). Air leakage characteristics in cracked concrete. 12 SMIRT, Stuttgart, Kussmaul K, Edition Elsevier science Pubs

Har Hannoura A.A. and Barends F. (1981). Non-Darcy flow: A state of the art. In: Proceedings of Euromech 143, Delft, 2-4 September 1981.

Hedegaard S.E., Hansen J., Johannesson T. (1992). Chloride Diffusion and corrosion initiation of steel reinforcement in fly-ash concrete, Building materials Laboratory, Technical University of Denmark, 1986, 13 p.381-387.

Hensen J. (1999). A comparison of coupled and de-coupled solutions for temperature and air flow in a building. University of Strathclyde (Scotland) - Energy Systems Research Unit.

Hermann K. (2000). Perméabilité au gaz des bétons. TFB bulletin du ciment n°11, novembre 2000.

Hers I. and Hood E. (2012). Sustainable Approaches for Soil Gas Mitigation Systems Proceedings AWMA 2012. Denver.

Hers I. and Zapf-Gilje, R. (1998). Canadian consortium research project field validation of soil gas transport to indoor air pathway. In Proceedings of the 1998 Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Groundwater; National Groundwater Association: Houston, Texas, 1998; p. 251-266.

Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics*. London. Academic Press.

Hintenlang D.E. and Al-Ahmandy K.K. (1992). Pressure differences for radon entry coupled to periodic atmospheric pressure variations. *Indoor Air* 2: 208-215.

Hodgson M. (1992). Field studies on the sick building syndrome. *Annals of the New York Academy of Sciences*, Vol.641, p. 21-36, ISSN 0077-8923.

Holford D.J. and Freeman H.D. (1996). Effectiveness of a Passive Subslab Ventilation System in Reducing Radon Concentrations in a Home. *Environ. Sci. Technol.* 30, 2914-2920.

Holman J. P. (2010). *Heat Transfer*, 10th Edition, Jack P. Holman, Southern Methodist University McGraw-Hill, New York, 2010. ISBN-13 9780073529363



Hulot C., Hazebrouck B., Gay G., Malherbe L., Pokryszka Z. (2003). Vapor emissions from contaminated soils into buildings: comparison between predictions from transport models and field measurements. Consoil 2003. May 12-16, 2003, Gent, Belgium. [www.ineris.fr](http://www.ineris.fr). Updated Version 14 may 2003.

Hulot, C., Gay,G., Hazebrouck, B., Thiam, A., Marot, F.(2010). Transfer of volatile compounds from soil: comparison between predictions and field measurements with different models; development of the volasoil model for a depleting source. Consoil 2010.

Interstate Technology & Regulatory Council (2007). Vapor Intrusion Pathway: A Practical Guideline. Disponible à: <http://www.it:rcweb.org>

I.E IDEL'CIK (1969). Mémento des pertes de charge - Coefficients de pertes de charge singulières et de pertes de charge par frottement. Traduction du Russe par Madame M. Meury. Collection n°13 du Centre de Recherches et d'essais du Chatou. Eyrolles, Paris.

IRSN (Institut de Radioprotection et Sûreté nucléaire) (2006). Guide sur le radon.[www.irsn.fr](http://www.irsn.fr)

IRSN (2012). Mesure de la perméabilité effective du sol aux gaz autour de la maison expérimentale MARIA du CSTB. RT/PRP-DGE/2012-00019.

Jacobi W. and Andrek K. (1963). The vertical distribution of radon 222 and radon 220 and their decay products in the atmosphere. *Journal of geophysical Res*, 68, p.3799-3814.

Jansen M.P.M., de Vries L., Phaff J.C., vander Graaf E.R., Blaaboer R.O., Stoop P, Lembrechts J. (1998). Modeling radon transport in dutch dwellings. Bilthoven, the Netherlands: National Intitute for public Health and the environnement (RIVM).RIVM report no.954101004.

Jellali S., Benremita H., Muntzer P., Razakarisoa O., Schäfer G.(2003). A large-scale experiment on mass transfer of trichloroethylene from the unsaturated zone of a sandy aquifer to its interfaces. *Journal of Contaminant Hydrology* 60, 31-53.

Jergling, A. (1981). Air Leakage Through Cracks in Concrete Elements. 2nd AIC Conference. Proceedings, Air Infiltration Centre, Old Bracknell Lane West, Bracknell,Berkshire, Great Britain, RG12 4AH.

Jiránek, M. (2000). Diffusive and Convective Transport of Radon through Cracks in the Building Understructure. In: Radon investigations in the Czech Republic VIII and the fifth international workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping, Český geologický ústav, Praha 2000, p. 65 - 70

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

Johnson, P. C., Hertz M. B., and Beyers D. L . (1990). Estimates for hydrocarbon vapor emissions resulting from service station remediations and buried gasoline-contaminated soils. In *Petroleum Contaminated Soils*, Vol. 3. Lewis Publishers, Chelsea, Michigan

Klepeis N.E., Nelson W.C., Ott W.R. (2001). The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*; 11: 231-52.

Keskikuru, T., Kokotti, H., Lammi, S. and Kalliokoski, P.( 2001). Effect of various factors on the rate of radon entry into two different types of houses. *Building and Environment*, 36 (10), 1091-1098.

Kimball, B.A.and Lemon, E.R. (1971). Air turbulence effects upon gas exchange. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35:16-21.

- Kliest J., Fast W., Boleij J.S.M., Van de Wiel H., Bloemen H. (1989). The relation between soil pollution and indoor air pollution with volatile organic compounds. Proceedings of the 4th international conference on indoor air quality and climate Berlin, p. 122-25.
- Koffi J. (2009) Analyse multicritère des stratégies de ventilation en maisons individuelles. thèse Université de la Rochelle.
- Krylov V.V and Fergusson C.C. (1998). Contamination of Indoor Air by toxic Soil Vapors: The effects of subfloor Ventilation and Other Protective Measures. Building and Environment, Vol.33.No.6.pp331.347.
- Lahvis, M. A.; Baehr, A. L.; Baker, R. J.(1999) Quantification of aerobic biodegradation and volatilization rates of gasoline hydrocarbons near the water table under natural attenuation conditions. Water Resour. Res.1999, 35 (3), 753–765.
- Lajoie, P., Leclerc J.M., Schnebelen (2006). La ventilation des bâtiments d'habitation : impact sur la santé respiratoire des habitants. Institut national de santé publique
- Little J.C., Daisey J.M. et Nazaroff W.W. (1992). Transport of subsurface contaminants into buildings, Environmental Science & Technology 26 (11):2058-2066.
- Loureiro, C.O., Abriola, L.M., Martin, J.E., Sextro, R.G. (1990). Three-Dimensional Simulation of Radon Transport into Houses with Basements under Constant Negative Pressure, Environmental Science and Technology, 1990, 24, 1338-1348.
- Luo H., Dahlen P., Johnson P. C., Peargin T., Creamer, T.(2009) Spatial variability of soil-gas concentrations near and beneath a building overlying shallow petroleum hydrocarbon-impacted soils. Ground Water Monit. Rem. 2009, 29 (1), 81–91.
- Maier U. and Grathwohl P. (2005). Natural attenuation in the unsaturated zone and shallow groundwater: coupled modeling of vapor phase diffusion, biogeochemical processes and transport across the capillary fringe. Reactive Transport in Soil and Groundwater: Processes and Models, 141-155 pp.
- Marsily G. de (1981). Hydrogéologie quantitative Ed. Masson Paris (1981).
- Martys N. (2001). Improved approximation of the brinkman equation using a lattice Boltzmann method. Physics of fluids, volume 13, number 6.
- Marzougui S. (2013). Transfert de composés organo-chlorés depuis une zone source localisée en zone non saturée d'un aquifère poreux vers l'interface sol-air : expérimentations et modélisations associées. Thèse Université de Strasbourg.
- Massmann J. and Farrier D. F. (1992). Effect of atmospheric pressures on gas transport in the vadose zone. Water Resources Research, 1992, 28(3)777-791.
- Mayer G., Jacobs F. and Wittmann F.H. (1992). Experimental determination and numerical simulation of the permeability of cementitious materials. Nuclear Engineering and Design, 138, 171-177.
- Meininghaus R., Knudsen H.N. and Gunnarsen L. (1998). Diffusion and sorption of volatileorganic compounds in indoor surface materials, EPIC '98, Proceedings of the of the Second European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings and the Third International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation, Lyon, France, Vol. 1, pp. 33–38.
- McAlary T. D., Bertrand P., Nicholson S., Wadley, D. Rowlands G., Thrupp and R. Ettinger (2011) Pneumatic Testing, Mathematical Modeling and Flux Monitoring to Assess and Optimize the Performance and Establish Termination Criteria for Sub-Slab Depressurization Systems. Presentation at US EPA Workshop on Vapor Intrusion AEHS Soil and Sediment Conference, 2011, San Diego, CA, March.



- Millington R.J. and Quirk J.M. (1961). Permeability of Porous Solids, *Trans. Faraday Soc.*, 1961, 1200-1207.
- Mivelaz P. (1996). Étanchéité des structures en béton armé, fuites au travers d'un élément fissuré, Thèse EPFL Lausanne n°1539.
- Moldrup P., Olesena T., Gamsta J., Schjønningb P., Yamaguchic T. and Rolston D.E. (2000 a). Predicting the Gas Diffusion Coefficient in Repacked Soil Water-Induced Linear Reduction Model. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 1588-1594
- Moldrup P., Olesena P., Schjønningb, T. Yamaguchic and D. E. Rolstond. (2000 b ). Predicting the Gas Diffusion Coefficient in Undisturbed Soil from Soil Water Characteristics. *Soil Science Society of America Journal*.Vol. 64 No. 1, p. 94-100.
- Mounajed, M.R. (1989). La modélisation des transferts d'air dans les bâtiments application à l'étude de la ventilation. Thèse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
- Mowris R.J. (1886). Analytical and numerical models for estimation the effect of exhaust ventilation on radon entry in houses with basement or crawl spaces. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley Laboratory; Report No. LBL-22067.
- Mowris R. J. and Fisk W.J. (1988). Modelling the effects on exhaust ventilation on 222Rn entry rates and indoor 22Rn concentrations. *Health Physics* Vol 54.No.5 (May), p.491-501.
- Musielak M. (2012). Étude numérique et Expérimentale des transferts de Composés Organiques Volatils du sol à l'air ambiant, en passant au travers du béton. Thèse de l'Université de Toulouse.tel-00753550.
- Nazaroff W.W. (1988). Predicting the rate of 222Rn entry from soil into basement of a dwelling due to pressure-driven air flow. *Radiation Protection Dosimetry* Vol.24 No.1/4 pp.199-202. Nuclear technology Pub.
- Nazarof W.W. and Sextro R.G. (1989). Technique for Measuring the Indoor 222 Rn Source Potential in Soil. *Environmental Science and Technology*, vol., 23, p.451-458
- Nazaroff W. W., Feustel H., Nero A. V., Revzan K. L. and Grimsrud D. T. (1985). Radon transport into a detached one-story house with a basement. *Atmospheric Environment*, 19, 31-46.
- Nazaroff W.W. (1992). Radon transport from soil to air, *Reviews of Geophysics*, 30, 137-160, 1992.
- Nazaroff W.W. (2003). Review of "Application of Risk-Based Screening Levels and Decision Making to Sites with Impacted Soil and Groundwater".Scientific Peer Review of Risk Based Screening Levels Developed by San Francisco Bay Regional Water Quality Control Board.
- Nielsen K.K., Rogers V.C., Pugh T.D., Grondzik W.A., Meijer R.J.(1997). Radon Penetration of concrete Slab Cracks, Joints, Pipe Penetrations, and Sealants. *Health Physics Society* 73 (4):668:678.
- Nuess M. (1989). Northwest residential radon standard volume 1 "project report'. Bonneville Power Administration Report, Portland, OR.
- Nyame B. K. and Illstion J.M. (1980).Capillary pore structure and permeability of hardened cement past , seventh International congress on the chemistry of cement. Paris. France. Vol 3, Theme 7.p. 6-1/6-5.
- OMS (Organisation Mondiale pour la Santé) (2005) Radon et cancer, juin 2005.

- Olesen, T., Gamst J., Moldrup P., Komatsu T. and Rolston D.E. (2001). Diffusion of sorbing organic chemicals in the liquid and gaseous phases of repacked soil. *Soil Science Society of America Journal* 65, 1585-1593.
- Olson D. A., and Corsi R. L. (2001). Characterizing Exposure to Chemicals from Soil Vapor Intrusion Using a Two-Compartment Model. *Atmospheric Environment* 35:4201-4209.
- Ostendorf D. W. and Kampbell D. H. (1991). Biodegradation of hydrocarbon vapors in the unsaturated zone. *Water Resour. Res.*, 27 (4), 453–462.
- Patterson B. M. and Davis G. B. (2009). Quantification of vapor intrusion pathways into a slab-on-ground building under varying environmental conditions. *Environ. Sci. Technol.*, 43 (3), 650–656.
- Pennell, K. G., Bozkurt, O., Suuberg, E. M. (2009a). Development and Application of a 3-D Finite Element Vapor Intrusion Model. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 2009, 59: 447-460
- Pennell K. G, Bozkurt O., Suuberg , E. M. (2009b). Vapor Intrusion Site Characterization - Why Invest the Time, Effort and Money in Modeling? Brown University, Division of Engineering, 182 Hope Street, Providence, RI.
- Penman, H.L. (1940). Gas and vapor movements in the soil. The diffusion of vapours through porous solids. *Journal of Agricultural Science* 30, 437-462.
- Powers T.C., Copeland L.E, Mann H.M. (1989). Capillary Continuity or discontinuity in cement pastes, *Journal of the Portland Cement Association Research and Development Laboratories*, Vol, N°2, pp38-48.
- Picandet V. (2001), Influence d'un endommagement mécanique sur la perméabilité et diffusivité hybride des bétons. Thèse de doctorat, université de Nantes, 2001.
- Provoost J., Bosman A., Reijnders L., Bronders J., Touchant K., Swartjes F. (2010). Vapour intrusion from the vadose zone—seven algorithms compared. *Journal of Soils and Sediments*, 10 (3), 473-483.
- Put L.W. de Meijer R.J. (1989). Air pressure differences in and around residences: implications for the transport for radon, *Universiteit Groningen, Nederland*.
- Ristensen A.H., Mortensen L., Høj A.R., Moldrup P. (2008). Undersøgelse ved brug af kerneboringer. *Vand & Jord* 15, 84-88.
- Rolston D.E. (1986). Gas diffusivity. In *Methods of soil analysis, part I. Physical and Mineralogical Methods*, 2nd ed. Edited by A. Klute. *Agronomy Monograph No9*, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison Wis.: 1089-1102.
- Reddy T. A., Gadsby K. J., Black H. E.; Harrje D. T., Sextro R.G. (1991). Modeling Air Flow Dynamics in Radon Mitigation Systems: A Simplified Approach. *Journal of the Air and Waste Management Association*. 1991; 41(11):1476-1482.
- Renaud H. (2010). *Fondations et soubassements*. Éditeur : Eyrolles; 2e édition (30 septembre 2010). Collection Maisons individuelles. p.76. ISBN : 2212127863.
- Reinhardt H.W. and Joss M. (1998). Permeability, diffusion, and capillary absorption of concrete at elevated temperature in the service range, *Otto-Graf-Journal* (9): 34-47.
- Renken K.J. and Rosenberg T. (1996). Laboratory measurements of the transport of radon gas through concrete samples. *Health Physics*, 68 (6), 800-808.
- Revzan K.L., W.J. Fisk and Gadgil A.J. (1991). Modeling radon entry into houses with basements: Model description and verification. Presented at *Indoor Air 90*, July 29-August 3 1990, Toronto, Canada. Lawrence Berkeley Laboratory Report LBL-27742.

- Revzan K.L. and Fisk W.J. (1992). Modeling Radon Entry into Houses with Basements: The Influence of the Structural Factors. *Indoor Air* 1992; 2: 40-48.
- Rikken M.G.J., Lijzen. J.P.A., Cornelese A.A. (2001). Evaluation of model concepts on human exposure routes of CSOIL. RIVM, Bilthoven RIVM Report 711701022.
- Riley, W.J. (1996). Wind-induced contaminant transport in near-surface soils with application to radon entry into buildings. Departments of engineering-Civil and Environmental, university of California at Berkeley, 265p.
- Riley, W.J., Gadgil, A.J., Bonnefous, Y.C. and Nazaroff, W.W. (1996). The effect of steady winds on radon-222 entry from soil into houses. *Atmospheric Environment*, 30 (7), 1167-1176.
- Robé M.C., Tirmarche M. (2003). Radon dans les bâtiments. *Techniques de l'ingénieur*; 384: 1-16.
- Robinson A. L., and Sextro R.G. (1995). The Influence of a Subslab Gravel Layer and Open Area on Soil-Gas and Radon Entry into Two Experimental Basements. *Health Physics* 69 (1995): 367-377.
- Robinson A.L. (1997) Soil-gas entry into an experimental basement driven by atmospheric pressure fluctuations measurements, spectral analysis, and model comparison. *Atmospheric Environment Vol 31, No.10*, pp. 1477-1485.
- Robinson A. L. and Sextro, R.G. (1997). Radon Entry into Buildings Driven by Atmospheric Pressure Fluctuations. *Environmental Science & Technology*. 31 (1997): 1742-1748.
- Rogers V.C, Nielson K.K. (1991). Multiphase radon generation and transport in porous material. *Health Phys.* 1991a; 60Z6. 807-815.
- Rolston D.E., Glauz G.L., Grundmann, Louie D.T. (1991). Evaluation of an in-situ method for measurement of gas diffusivity in surface soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:1536-1542.
- Saad Y. and M.H. Schultz (1986). GMRES: A Generalized Minimal Residual Algorithm for Solving Nonsymmetric Linear Systems. *SIAM J. Sci. Statist. Comput.*, vol. 7, pp. 856-869, 1986.
- Schäfer G., Bohy M., Dridi L., Nex F., Pollet I., Razakarisoa O., Zeru A., Bano M., Barzewski B., Merheb F. (2005). Forschungsarbeiten am Deutsch-Französischen Institut für Umweltforschung zum Transfer und Verbleib von LCKW in Porengrundwasserleitern In: Ressource Untergrund – 10 Jahre VEGAS: Forschung und Technologieentwicklung zum Schutz von Grundwasser und Boden, Hrsg.: J. Braun, H.-P. Koschitzky, M. Müller. *Mitteilungen des Instituts für Wasserbau, Universität Stuttgart, Heft 145*, pp 89-97, ISBN 3-933761-48-4.
- Scott A. G. (1985). A computer model study of soil gas movement into buildings. Report No. 1389/1333, Department of Health and Welfare, Ottawa, Ontario, Canada.
- Sextro R.G. (1987). Understanding the origin of radon indoors--Building a predictive capability. *Atmospheric Environment* (1967). Volume 21, Issue 2, pages 431-438.
- Sherman M. H. (1980). Air Infiltration in Buildings, PhD Thesis, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, LBL-10712.
- Sherman M. H. (1992a). Simplified modeling for infiltration and radon entry. LBL-31305, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA.
- Sherman M.H (1992b). Superposition in infiltration modeling. *Indoor Air* 1992; 2: 101-114.12.

Snow, D.T. (1969). Anisotropic permeability of fractured media, Water resources Research, vol. 5, n°6, p. 1273-1289.

Soutter M., Mermoud A., Musy A. (2007). Ingénierie des eaux et du sol : Processus et aménagements. Éditeur : PPUR. ISBN : 978-2-88074-724. p. 294.

Sunderland J. E., Kenneth R.J. (1964). Shape factors for heat conduction through bodies with isothermal or convective boundary conditions. ASHRAE 71st Annual Meeting in Cleveland, Ohio.

Suzuki T., Takigushi K., Hotta H. (1992). Leakage of gas through concrete cracks, Nuclear engineering and design, vol 133 (1), p.121-130.

Table curve 2D

[http://www.sciencedownload.com/Graph\\_Plotting/Curve\\_Fitting/TableCurve\\_2D/](http://www.sciencedownload.com/Graph_Plotting/Curve_Fitting/TableCurve_2D/)

Tillman F.D. and Weaver JW. (2005). Review of Recent Research on Vapor Intrusion. Athens, GA: U.S. Environmental Protection Agency. EPA/600/R-05/106.

Tillman F. D. and Weaver J. W. (2006): Uncertainty from synergistic effects of multiple parameters in the Johnson and Ettinger (1991) vapor intrusion Atmospheric Environment. Volume 40, Issue 22, p. 4098-4112.

Turk B.H., Prill R. J., Grimsrud D. T., Moed B. A and Sextro R. G. (1990). Characterizing the occurrence, sources, and variability of radon in Pacific Northwest homes. J. Air Waste Management Association, 40, 498-506.

Troeh F.R., Jabro J.D. et Kirkham D. (1982). Gaseous diffusion equations for porous materials; Geoderma 27: 239-253.

U.S. Health Department (2007). Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Evaluating Vapor Intrusion Pathways at Hazardous Waste Sites Introduction Volatile organic chemicals. Department of Health and Human Services toxicological.

US-EPA (1991). Sub-Slab Depressurization for Low-Permeability Fill Material. Design & Installation of a Home Radon Reduction System. Office of Research and Development, Washington DC.

US-EPA (1993). Radon reduction techniques for existing detached houses. Technical guidance for Active Soil Depressurisation systems. 3rd ed. USEPA, EPA/625/R-93/011. tel-00683739, version 1 - 29 Mar 2012.

US-EPA (2002). Users guide for evaluating subsurface vapor intrusion into buildings.

US-EPA (2003). User's guide for evaluating subsurface vapor intrusion into buildings.

US-EPA (2004). Users guide for evaluating subsurface vapor intrusion into buildings.

US-EPA (2007). Benzene. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Air and Radiation. 2007.

US-EPA (2012). Conceptual Model Scenarios for the Vapor Intrusion Pathway, U.S. Environmental Protection Agency, EPA 530-R-10-003, February 2012.

Urosevic V. and Nikezic D. (2003). Radon transport through concrete and determination of its diffusion coefficient. Radiation Protection Dosimetry 104 (1): 65-70. Nuclear Technology Publishing.

Van den Berg R. (1994). Human exposure to soil contamination: a qualitative and quantitative analysis towards proposals for humantoxicological intervention values (partly revised edition). National Institute of Public Health and Environmental Protection, Bithoven, The Netherlands. Report 755201011. April 1991/January 1994.

Vàzquez, B.J. (2011). Experimental study of the effectiveness of four random mitigation solutions, based on underground depressurization, tested in prototype housing built in a high radon area in Spain. *Journal of Environmental Radioactivity*. 102 (2011), 378-385.

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.

Ward D. C., Borak. T. B. and Gadd M. S. (1993). Characterization of 222 Rn entry into a basement structure surrounded by low permeability soil. *Health Physics*, 65, 1-11.

Washington J.W., Rose A.W., Ciolkosz E.J. and Dobos R.R. (1994). Gaseous diffusion and permeability in four soil profiles in central Pennsylvania. *Soil Sci*. 157: 65-76.

Weaver J. W. and Tillman, F. D. (2005). Uncertainty and the Johnson-Ettinger Model for vapor intrusion calculations. EPA/600/R-05/110, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington DC.

Wood J.A., Porter M.L. (1987). Hazardous pollutants in class II landfills. *Journal of Air pollution control Association*, 37(5): 609-15.

Yao Y., Shen R.; Pennell K.G., Eric M. Suuberg (2011). Comparison of the Johnson-Ettinger Vapor intrusion Screening Model with Full Three Dimensional Model Results. *Environ.Sci.Technol*.

Yao Y., Pennell K.G., Suuberg E.M. (2012). Estimation of contaminant subslab concentration in vapor intrusion. *Journal of hazardous materials* 06/2012; 231-232:10-7.

Yao Y. , Shen R. , Pennell K.G., Suuberg E.M. (2013). A review of vapor intrusion models. *Environ Sci Technol*. Mar 19;47(6):2457-70.

**SIEGE SOCIAL**

84, AVENUE JEAN JAURÈS | CHAMPS-SUR-MARNE | 77447 MARNE-LA-VALLÉE CEDEX 2  
TÉL. (33) 01 64 68 82 82 | FAX (33) 01 60 05 70 37 | [www.cstb.fr](http://www.cstb.fr)

**CSTB**  
*le futur en construction*

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT | MARNE-LA-VALLÉE | PARIS | GRENOBLE | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS