



---

**Ingénieur du génie sanitaire**

Promotion : **2010-2011**

---

## **Note de synthèse**

**Examen et optimisation de l'outil de modélisation des concentrations de polluants dans l'air ambiant générées par la contamination du sous-sol et de l'exposition humaine dans le cadre de l'évaluation des risques sanitaires liés à l'usage d'un site pollué**

---

Cédric ALO

**Lieu du stage :**

HPC Envirotec

**Référents Professionnels :**

Maxime ELLUIN

Lucie ROBIN-VIGNERON

**Référent pédagogique :**

Philippe GLORENNEC

# **I. Contexte**

## **A. Contexte juridique des sites et sols pollués**

A l'heure actuelle, la politique nationale de gestion des sites et sols pollués s'appuie sur la circulaire du 8 février 2007. Cette dernière est orientée autour de trois axes que sont :

- La construction d'un schéma conceptuel traduisant l'interaction entre des sources de pollution, des voies de transfert (vecteurs) et des cibles ;
- L'interprétation de l'Etat des Milieux (IEM) permettant de vérifier que cet état (généralement hors site) n'admet pas d'écart par rapport à la gestion sanitaire et environnementale mise en place pour l'ensemble de la population française ;
- Le Plan de Gestion (PG) visant à gérer ou réhabiliter un site en vue notamment de ses usages futurs en tenant compte à la fois de critères financiers, sanitaires et environnementaux.

Par ailleurs, trois annexes accompagnent cette circulaire et constituent des guides à destination des différents acteurs du domaine des sites et sols pollués.

Il est à noter que cette circulaire n'a aucun pouvoir législatif. A ce titre, la gestion des sites et sols pollués ne dispose d'aucun cadre juridique propre. Par conséquent, elle s'appuie sur un socle législatif formé par le code de l'Environnement et plus particulièrement le livre V intitulé « Prévention des pollutions, des risques et des nuisances » ainsi que le code civil et le code de l'urbanisme.

## **B. Les différents enjeux**

Au-delà des questions financière, sociale et urbanistique, les enjeux de la gestion des sites et sols pollués sont majoritairement d'ordre sanitaire et environnemental. La pollution des sols et des eaux souterraines porte ainsi atteinte à la qualité de l'environnement et est susceptible d'engendrer une exposition à des substances potentiellement toxiques entraînant des effets sur la santé des populations. Dans le cadre d'une politique de gestion du risque suivant l'usage du site conformément à la circulaire du 8 février 2007, l'outil utilisé est l'Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires (EQRS). Cependant dans le cadre d'études à caractère prospectif, il n'est généralement pas possible d'effectuer des mesures de concentrations dans les milieux d'exposition permettant la quantification du risque. Ceci est particulièrement vrai dans le cas de l'air intérieur. La modélisation apparaît alors comme la seule alternative permettant d'estimer ces expositions et permet donc de prévenir d'éventuels problèmes futurs de santé publique.

Dans le cadre de l'air intérieur, de nombreuses sources non quantifiables de polluants, majoritairement des Composés Organiques Volatils (COV), sont susceptibles d'exister au sein même des bâtiments, causant de multiples effets sur la santé. Les mesures de concentrations dans l'air intérieur, lorsqu'elles sont réalisables, ne permettent alors pas de distinguer la part attribuable à la pollution des sols et sont sujettes à une grande variabilité temporelle. Sur la base de ces informations, la définition des concentrations maximales admissibles dans les milieux sources liées à un risque sanitaire acceptable et par conséquent les mesures de gestion envisagées manqueront de pertinence. La modélisation permet alors de mieux comprendre l'origine des pollutions tout en garantissant une représentativité temporelle et spatiale. Ainsi, dès lors que le paramétrage est réalisé avec des données propres au site suffisamment exhaustives, la modélisation peut constituer une aide à la décision.

## II. Objectifs

Dans le cadre des évaluations de risques sanitaires, des écarts sont observés d'une part entre l'outil de modélisation d'HPC et les autres modèles et d'autre part avec les concentrations effectivement mesurées dans l'air intérieur. Ses écarts sont susceptibles d'avoir des conséquences en termes de santé des populations en particulier dans le cas d'une sous-estimation des concentrations et donc du risque inhérent.

Il existe actuellement de nombreux modèles permettant d'estimer les concentrations dans l'air intérieur dans le cas d'une pollution provenant du sol. Ce mémoire, par l'analyse des modèles les plus adaptés à ce type de modélisation, permettra d'identifier ceux applicables à une situation précise et de comparer les différentes approches en termes d'équations utilisées, de phénomènes modélisés et de résultats obtenus. Une inter-comparaison de ces résultats sur un cas précis et avec des données issues de campagnes de mesures devra permettre :

- d'identifier le modèle le plus protecteur ainsi que celui le plus adapté au type de situation rencontré ;
- d'examiner la pertinence de l'outil d'HPC Envirotec (vis-à-vis des autres modèles) ainsi que ses limites d'utilisation ;
- d'inclure si besoin de nouvelles équations voire d'inclure de nouveaux modules de façon à optimiser l'outil et le rendre utilisable dans l'ensemble des cas rencontrés ;
- d'identifier les incertitudes de façon à être à même d'évaluer leurs conséquences sur le plan de la santé humaine et des mesures de gestion.

Du fait du nombre important de paramètres utilisés et de la difficulté d'attribuer, pour chacun d'eux, une valeur propre au site étudié, la littérature propose des valeurs standards pouvant avoir une influence importante sur le résultat final. L'objectif secondaire de ce mémoire est d'identifier ces paramètres de façon à ce que, dans la mesure du possible, leur quantification soit réalisée lors de futures modélisations. Dans le cas contraire, une recherche bibliographique devra permettre de leur attribuer une valeur protectrice à l'égard de la santé humaine.

Enfin, ce mémoire se limite au **transfert de polluants organiques sous forme gazeuse depuis le sol ou les eaux souterraines vers l'air intérieur au travers des fondations du bâtiment**. A ce titre, seule la voie d'exposition inhalation d'air intérieur sera étudiée. En effet, cette voie d'exposition peut s'avérer importante voire majoritaire dans le cas d'une pollution présente en sous-sol. De plus, c'est dans le cas de ce type de modélisation que sont observés les écarts les plus importants.

Ce mémoire, par l'amélioration de l'outil de modélisation, devrait donc contribuer à améliorer l'identification des sources de pollution en définissant, lors des EQRS, la part de la concentration dans l'air intérieur attribuable à la pollution du sol indépendamment des sources intérieures et extérieures, permettant ainsi une meilleure estimation du risque sanitaire correspondant et de mieux cibler les mesures de gestion à mettre en œuvre en termes de pertinence et d'efficacité.

### III. Matériel et méthode

Afin de mener à bien les évaluations de risques sanitaires dans le cadre des projets qui lui sont confiés, la société HPC Envirotec a développé son propre outil de modélisation construit sur la base de modèles existants. Ce recodage des différentes équations sur une feuille de calculs Excel est, en effet, recommandé par l'INERIS de façon à en assurer la compréhension et apprécier les limites du modèle considéré. Cela est aussi en faveur d'une certaine transparence des résultats et de la non utilisation des modèles en tant que « boîte noire ».

La prise en main de l'outil de modélisation d'HPC Envirotec s'est avérée être la première étape lors de la réalisation de ce mémoire. Celle-ci a permis de comprendre son fonctionnement ainsi que d'identifier les différentes équations utilisées. L'analyse plus poussée de la documentation relative aux modèles inclus a assuré la compréhension des phénomènes mis en jeu ainsi que la mise en évidence des limites apparentes du modèle.

Au regard des écarts importants d'une part entre les modèles et d'autre part entre les concentrations modélisées et les concentrations effectivement mesurées dans l'air intérieur, le but d'une recherche bibliographique était d'identifier les modèles les plus couramment utilisés à l'heure actuelle et donc, en théorie, les plus adaptés pour la modélisation des concentrations dans l'air intérieur à partir d'une contamination du sol ou des eaux souterraines.

Cela a été l'occasion d'inclure de nouveaux modules au sein de l'outil afin, par la suite, de réaliser plus simplement une comparaison inter-modèles avec des paramètres uniformisés. Afin de comprendre de façon plus précise le rôle de chaque paramètre sur le résultat final, une étude de sensibilité a été menée au moyen d'une macro sous Excel dans l'objectif de mettre en évidence les paramètres ayant le plus d'influence et ceci pour l'ensemble des modules intégrés au sein de l'outil.

La comparaison inter-modèles constitue le cœur du mémoire. Une revue bibliographique sur ce type d'étude dans le cadre de l'air intérieur a été réalisée, de même qu'une comparaison directe entre les modèles Johnson et Ettinger, HESP, VOLASOIL, RISC WorkBench et CalTOX sur des scénarii de pollution précis. Le but était de mettre en évidence les écarts ainsi que d'apporter des hypothèses permettant de les expliquer.

Une fois cette comparaison effectuée, il était intéressant d'apprécier la validité des différents modèles ou tout du moins d'examiner la corrélation de leurs résultats avec des mesures de terrains. Après analyse des données de terrain disponibles au sein du bureau d'études, il s'est avéré que celles-ci n'étaient pas exploitables ou qu'aucune conclusion ne pouvait être apportée du fait du manque d'information les concernant. Cependant la littérature sur le sujet de la contamination de l'air intérieur à partir d'une pollution du sous-sol mentionnait l'existence d'une base de données réalisées par l'US EPA dans l'optique d'examiner la validité du modèle Johnson et Ettinger. Cette dernière a donc été récupérée et examinée en termes de contenu et de qualité d'information. Du fait, du nombre important de mesures de concentrations dans les eaux souterraines, dans les gaz du sol ainsi que dans l'air intérieur, la réalisation d'une macro sous Excel a permis de réaliser simplement une modélisation pour chaque concentration et paramètre disponible, le but final étant de comparer les résultats de la modélisation avec les concentrations mesurées dans l'air intérieur.

Les incertitudes liées à ce type de modélisation biaisant les résultats lors de la comparaison avec les mesures de terrain ont été analysées ainsi que leurs conséquences sur le plan de la santé humaine et de la gestion de la pollution. Au regard de leur nombre important, une étude des incertitudes a été réalisée sur l'outil d'HPC Envirotec au moyen du logiciel @Risk et de simulations de type MONTE CARLO afin d'observer l'intervalle de valeurs dans lequel se trouvent les concentrations modélisées en fonction des intervalles de valeurs proposés dans la littérature pour les paramètres d'entrée.

Pour finir, l'ensemble de ces résultats et observations a constitué une base de réflexion pour améliorer l'outil d'HPC Envirotec afin de répondre aux attentes de l'évaluateur de risques en termes de simplicité, de rigueur scientifique, de compréhension des résultats ainsi que d'applicabilité.

## IV. Résultats

De la première recherche bibliographique, il ressort que de nombreux modèles présentent un module spécifique à l'air intérieur permettant ce type de modélisation et que la majorité d'entre eux n'est pas dédiée à ce cas précis. Par ailleurs, selon l'INERIS, les modèles les plus couramment utilisés sont:

- Le modèle Johnson et Ettinger basé sur l'algorithme de Paul C. Johnson et Robert A. Ettinger de 1991. Ce modèle est actuellement recommandé par l'US EPA pour lequel l'agence propose depuis 2004 une feuille de calculs Excel.
- Le modèle HESP 2.10b dont la dernière version date de 1995, anciennement recommandé par le RIVM (institut néerlandais pour la protection de la santé et de l'environnement) et développé par SHELL Internationale Petroleum.
- Le modèle VOLASOIL, actuellement recommandé par le RIVM. Ce dernier dont les équations sont décrites dans les travaux de Waitz et al. (1996) est proposé dans la dernière version du logiciel commercial Risc Human.
- Par ailleurs, le modèle CalTOX, de part le nombre important de voies d'exposition qu'il prend en compte est régulièrement utilisé dans le cadre des évaluations quantitatives de risques sanitaires.

L'outil d'HPC Envirotec construit, dans le cadre de l'air intérieur, sur la base des modèles Johnson et Ettinger, HESP et RISC WorkBench a été complété par l'ajout du module VOLASOIL et des modules supplémentaires basés sur les travaux de Johnson et Ettinger correspondant à l'hypothèse de source infinie et de contamination des eaux souterraines.

L'étude de sensibilité montre des résultats variables suivant les modèles. Cependant, il ressort globalement que les paramètres en lien avec la concentration dans l'air du sol notamment la constante de Henry sont les plus sensibles. Pour les modèles se basant sur un mécanisme de transfert par convection, la perméabilité intrinsèque constitue un paramètre important alors que la teneur en air du sol apparaît comme plus sensible pour le transfert par diffusion.

La revue bibliographique sur les comparaisons inter-modèles met en évidence des écarts importants entre les modèles dans le cadre spécifique de l'air intérieur. Il est à noter que ces écarts s'avèrent être plus conséquents que pour les autres types de modélisations. Par ailleurs, le nombre importants d'incertitudes liées aux résultats d'une telle modélisation rend difficile tout type de validation expérimentale. Parmi les modèles étudiés, le modèle Johnson et Ettinger a fait l'objet de nombreuses études. A ce titre, certaines conclusions ont pu être apportées quant à sa validité et notamment le fait qu'il modélise correctement les concentrations dans l'air intérieur à partir d'une source présente dans le sol ou les eaux souterraines et ceci pour les substances faiblement sujettes à la biodégradation. Le modèle VOLASOIL, quant à lui, tend à surestimer les concentrations. Aucune étude ne valide l'usage des modèles HESP, CalTOX et RISC WorkBench dans le cadre de l'air intérieur.

La comparaison directe menée dans le cadre de ce mémoire montre que VOLASOIL modélise des concentrations supérieures à celles des autres modèles alors que les concentrations modélisées par CalTOX sont inférieures de plusieurs ordres de grandeur. Les différences observées entre les modèles HESP, Johnson et Ettinger et RISC WorkBench s'expliquent potentiellement par la non

prise en compte de certains phénomènes ou la réalisation (en première approximation) de certaines adaptations en fonction du type de fondations étudié. Cependant, il est plus difficile d'apporter des conclusions certaines concernant CalTOX, du fait de la modélisation de certains phénomènes et de la prise en compte d'hypothèses menant théoriquement à des résultats inférieurs à ceux des autres modèles.

La comparaison des résultats de modélisations avec les mesures de terrains de la base de données de l'US EPA met en évidence une bonne corrélation des résultats du modèle Johnson et Ettinger dans le cas d'une pollution des eaux souterraines. De même, VOLASOIL semble bien adapté à ce type de modélisation bien que ses résultats soient supérieurs à ceux du modèle Johnson et Ettinger. Cependant, les modèles CalTOX et RISC WorkBench semblent sous-estimer de plusieurs ordres de grandeurs les concentrations réelles. L'utilisation de ces deux modèles, dans le cadre d'évaluation de risques sanitaires liés à l'inhalation d'air ambiant intérieur, est donc susceptible de générer une sous-estimation des concentrations et par conséquent du risque sanitaire. Par ailleurs, il semble récurrent que lors d'une modélisation à partir d'une concentration relativement faible à la source, les modèles tendent à sous-estimer les concentrations dans l'air intérieur alors qu'est observé le comportement contraire dans le cas d'une modélisation à partir d'une concentration élevée.

Cependant, de nombreuses incertitudes entourent les résultats de la modélisation. Ainsi, ce type de comparaison est nécessairement biaisé du fait, en particulier, de la présence de sources de polluants non quantifiables et non corrélées à la pollution du sol. Il est donc difficile d'apprécier la validité de chaque modèle. Cependant le fait de corréliser aux concentrations mesurées permet d'assurer le caractère protecteur du modèle dans la mesure où la part de la concentration dans l'air intérieur attribuable à la pollution du sol est nécessairement inférieure ou égale à la concentration totale.

L'ensemble de ces résultats a permis d'observer les limites de l'outil d'HPC en particulier celles dues au fait que certains modules ne sont pas, en théorie, adaptés à un certain type de fondations. Par conséquent, sur la base des observations et hypothèses apportées pour expliquer les écarts entre les modèles, certaines recommandations ont été énoncées et des modifications ont été apportées de façon à rendre l'outil applicable dans la majorité des cas rencontrés.

## Conclusion

Dans le cadre de projets d'aménagement(s) sur des sites pollués, la modélisation des concentrations dans les différents milieux d'exposition (et essentiellement l'air ambiant) apparaît régulièrement comme le cœur des évaluations quantitatives de risques sanitaires. Etant donné les conséquences de ses résultats sur le plan de la santé humaine et des mesures de gestion à mettre en œuvre le cas échéant, celle-ci doit nécessairement être la plus fiable et précise possible. Cependant, devant la complexité du phénomène que constitue le transfert de vapeurs depuis le sol vers l'air intérieur, les modèles adoptent différentes hypothèses et approximations entraînant des incertitudes plus ou moins importantes sur le résultat final.

Par ailleurs, certains modèles ont été conçus pour un type de fondations particulier et ne sont, à ce titre, pas théoriquement applicables dans d'autres cas. La réalisation d'adaptations permet de contourner ce type de difficulté mais peut s'avérer être une source d'incertitudes supplémentaires.

Cette étude a permis de mettre en évidence les paramètres majeurs utilisés dans l'outil de modélisation d'HPC Envirotec et pour lesquels un effort particulier devra être réalisé de façon à renseigner le modèle avec des valeurs propres au site étudié. Dans le cas où des mesures de terrain ne seraient pas techniquement ou économiquement réalisables, les valeurs proposées dans la littérature pourront être utilisées dans la mesure où elles s'avèrent être protectrice à l'égard de la santé humaine.

De surcroît, le modèle CalTOX, tel que proposé dans sa version 4.0, n'apparaît pas adapté au cas précis de l'air intérieur. De même, les modèles HESP et RISC WorkBench, du fait qu'ils ne modélisent pas la convection qui constitue un phénomène majeur assurant le transfert de vapeurs à proximité des constructions, tendent à sous-estimer les concentrations dans l'air intérieur. A ce titre, ils ne devront être utilisés qu'à titre de comparaison.

Enfin, il semble important de souligner que l'inhalation d'air intérieur n'est pas la seule voie d'exposition liée à la contamination des sols. En effet, certaines sont susceptibles d'occulter partiellement ou totalement celle inhérente à l'air intérieur et sont donc à évaluer le plus finement possible dans le cadre des évaluations quantitatives de risques sanitaires.

# Signatures

## Référents Professionnels

Maxime ELLUIN

## Référent Pédagogique

Philippe GLORENNEC

Lucie ROBIN-VIGNERON

## Elève

Cédric ALO