

RAPPORT D'ÉTUDE

15/04/2005

N° INERIS DRC-05-57278-DESP/R03a

**Etude des modèles d'évaluation de l'exposition
et des risques liés aux sols pollués**

**Modélisation du transfert de vapeurs du sous-
sol ou du vide sanitaire vers l'air intérieur**

Etude des modèles d'évaluation de l'exposition et des risques liés aux sols pollués

Modélisation du transfert de vapeurs du sous-sol ou du vide sanitaire vers l'air intérieur

Client: Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

PREAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Benoît HAZEBROUCK	Guillaume GAY	Jacques BUREAU
Qualité	Délégué aux prestations Direction des Risques Chroniques	Ingénieur à l'unité "Déchets et Sites Pollués" Direction des Risques Chroniques	Responsable de l'unité "Déchets et Sites Pollués" Direction des Risques Chroniques
Visa			

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION	4
2. FACTEUR DE DILUTION EMPIRIQUE HOLLANDAIS.....	4
2.1 Pratique actuelle	4
2.2 Modèles concernés et documents de référence.....	5
2.3 Origine du facteur de dilution empirique hollandais.....	6
2.4 Contrôle ultérieur du facteur de dilution empirique hollandais.....	9
2.5 Remarques complémentaires sur la mesure du transfert de vapeurs vers l'air intérieur.....	11
3. MODÉLISATION AU MOYEN DE VOLASOIL	12
4. MODÉLISATION PAR JOHNSON & ETTINGER.....	13
5. CONCLUSION.....	14
6. RÉFÉRENCES	15

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Taux de ventilation Vv du vide sanitaire et contributions fbi de l'air du vide sanitaire à l'air intérieur rapportés par Fast et al. (1987)	7
Tableau 2: Facteurs susceptibles d'influencer les taux de ventilation Vv du vide sanitaire et les contributions fbi de l'air du vide sanitaire à l'air intérieur mesurés, d'après Fast et al. (1987).....	8
Tableau 3: Résultats des mesures de ventilation rapportés par Stoop et al. (1998), et calculs INERIS associés.....	9
Tableau 4: Résultats des mesures de concentrations et de contributions rapportés par Stoop et al. (1998), et calculs INERIS associés.....	10

1. INTRODUCTION

Dans le cadre du programme TITRE IV-DRC15 "Evaluation des risques pour la santé liés aux sites et sols pollués" pour le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD), l'étude par l'INERIS des modèles d'évaluation de l'exposition et des risques liés aux sols pollués est prévue pour permettre une amélioration continue des outils utilisés en France, et/ou de leur utilisation.

Le présent document rend compte de l'étude d'un point particulier du transfert de vapeurs du sol vers l'air intérieur: le transfert de vapeurs du sous-sol ou du vide sanitaire vers l'air intérieur. Cette étude est orientée suivant les besoins apparus dans le retour d'expérience acquis par l'INERIS en matière d'Evaluation Détaillée des Risques (EDR)¹: la très grande majorité des EDR sur lesquelles l'INERIS est consultée concerne des aménagements en centre urbain sur friche industrielle, pour lesquelles une couverture des sols pollués et la présence de sous-sol (caves, parkings,...) sont prévues. Dans ces cas, le risque est déterminé par le transfert de vapeurs du sol jusqu'à l'air intérieur, *via* les sous-sols. Si la modélisation du transfert vers les sous-sols se pratique communément au moyen des outils standards², le passage du sous-sol vers l'air intérieur peut paraître plus problématique, faute d'outil standard connu comme directement applicable: des outils développés pour les vides sanitaires sont alors utilisés.

Dans le présent rapport, les trois principaux outils susceptibles d'être utilisés pour la modélisation du transfert de vapeurs du sous-sol ou du vide sanitaire vers l'air intérieur, dans le cadre des pratiques françaises actuelles, sont considérés successivement. Des conclusions sont ensuite proposées. Des considérations concomitantes sur le taux de ventilation du vide sanitaire et des sous-sols, et sur la mesure du transfert de vapeurs vers l'air intérieur, sont également incorporées au précédent rapport.

Le présent document est émis sur la base des connaissances et techniques disponibles au moment de sa réalisation.

2. FACTEUR DE DILUTION EMPIRIQUE HOLLANDAIS

2.1 PRATIQUE ACTUELLE

Le modèle le plus anciennement et le plus couramment utilisé en France pour le transfert de vapeurs du sous-sol ou du vide sanitaire vers l'air intérieur est l'application d'un facteur de dilution issu des modèles hollandais.

Les modèles pris en référence pour cela sont les modèles hollandais CSOIL (van den Berg *et al.*, 1994) et HESP (*Human Exposure to Soil Pollutants*: Veerkamp et ten Berge, 1994 ou version actualisée: Shell Global Solutions, 1995).

¹ Cf. par ex. INERIS, 2003.

² En France, essentiellement Johnson & Ettinger et VOLASOIL. Ces modèles mériteraient toutefois discussion. Cela fera l'objet d'un prochain rapport INERIS.

La concentration obtenue dans le sous-sol ou le vide sanitaire est multipliée par la "contribution de l'air de la fondation à l'air intérieur", notée fbi dans ces modèles, pour obtenir la concentration à l'intérieur du bâtiment. Nous avons repris ici la dénomination générale de HESP. CSOIL définit uniquement une "contribution de l'air du vide sanitaire à l'air intérieur". Cette contribution fbi est affectée d'une valeur de 0,1. HESP préconise toutefois un facteur de 0,2 pour un plancher en bois. CSOIL précise que la valeur de 0,1 correspond à la moyenne (arithmétique: "average") de valeurs expérimentales, entre un minimum de 0, un maximum de 0,68 et un 95^e centile de 0,39.

Ce facteur empirique pose un important problème de représentativité:

- de par la variabilité mesurée, comme signalé par van den Berg *et al.* (1994, p 30);
- de par l'absence d'informations accompagnant ce facteur: comment a-t-il été mesuré, la pollution de l'air intérieur a-t-elle été prise en compte? Pour quel type de sous-sol (vide sanitaire seulement, comme prévu dans CSOIL, ou indifféremment tout type de sous-sol, comme dans HESP), et de plancher (au delà de la différence béton/bois faite uniquement dans HESP), voire de conditions météorologiques, est-il applicable? Quelles contraintes de construction devraient en résulter?

2.2 MODELES CONCERNES ET DOCUMENTS DE REFERENCE

Dans ce chapitre, nous présentons succinctement le contexte des modèles concernés, de leurs documentations, et de leurs utilisations en Hollande et en France.

Le modèle CSOIL, développé par le RIVM, est utilisé en modèle de référence pour évaluer les risques liés à un site pollué et déterminer l'urgence de la dépollution. Il a été utilisé pour l'élaboration des listes hollandaises de 1994 de critères de qualité des sols (valeurs d'intervention I).

Le modèle d'exposition humaine HESP (Veerkamp et ten Berge, 1994, puis Shell Global Solutions, 1995) a été développé par un groupe de travail de l'industrie chimique européenne (ECETOC: *European Chemical Industry Ecology and Toxicology Centre*). Il est accepté en Hollande pour le calcul de l'exposition humaine aux côtés du modèle CSOIL. Le modèle HESP et le modèle CSOIL ont largement convergé, jusqu'à devenir quasi-identiques sur les parties communes³ en 1995, avant modification ultérieure de certains éléments de modélisation ou de paramétrisation de CSOIL (Waitz *et al.*, 1996; Otte *et al.*, 2001). Ces modifications n'ont pas affecté la valeur de 0,1 de fbi dans CSOIL.

³ Notamment pour des voies (bioconcentration dans les animaux, impacts sur les eaux souterraines) ou certaines configurations de sous-sol non développées dans CSOIL. Pour le reste, d'après Swartjes (1995), les deux modèles contiennent les mêmes équations et parviennent aux mêmes résultats.

Associé au logiciel commercial du même nom, le modèle HESP est largement utilisé en Europe depuis une dizaine d'années. Il a notamment servi de base pour l'élaboration des Valeurs de Constat d'Impact (VCI) françaises du dispositif de Gestion des Sites (Potentiellement) Pollués (MATE, 2000). Il a fait l'objet d'une Fiche technique de l'INERIS (2002).

Le modèle HESP a été publié pour la première fois dans la monographie n° 40 du groupement ECETOC (1990). Une version actualisée de l'annexe 3 du rapport ECETOC a été réalisée en mars 1992⁴ et sert de base au « *Reference Manual* » d'HESP, version 2.10b. Seuls quelques paramètres et équations ont été modifiés dans le manuel d'HESP par rapport à cette annexe 3 révisée.

2.3 ORIGINE DU FACTEUR DE DILUTION EMPIRIQUE HOLLANDAIS

La référence citée par CSOIL (van den Berg, 1994) et HESP pour la fraction 0,1 d'air du sous-sol ou du vide sanitaire contribuant à l'air intérieur (fbi), est Fast *et al.* (1987). La même fraction de 0,1 avait été retenue dans ECETOC, 1990 (p 103), mais sur la base d'une autre étude (ten Berge, 1985). ECETOC, 1990 (p 103) signale l'existence de valeurs jusqu'à 0,5.

On retrouve bien dans Fast *et al.* (1987) (Table 5.3.2) les valeurs de la distribution données dans CSOIL pour fbi, ainsi que la médiane (0,15), le coefficient de déviation standard (0,12) et le maximum (0,68), et une description de l'expérimentation. On y retrouve aussi la mesure du taux de ventilation Vv du sous-sol reporté dans CSOIL et HESP (valeur retenue: moyenne de 1,25/h), et utilisée dans certaines EDR en France.

Les conditions de mesure de la contribution fbi et du taux de ventilation Vv sont ainsi documentées dans Fast *et al.* (1987; p I, p 46 et Tableau 5.3.2):

- Mesures étalées de juin 1984 à novembre 1985;
- 82 mesures menées à terme pour fbi, 88 pour Vv, parmi environ 120 mesures lancées dans 97 habitations;
- Type de sous sol: essentiellement vides sanitaires, mais aussi éventuellement une ou quelques cave(s)⁵. Fast *et al.* (1987) utilisent la dénomination "contribution de l'air du vide sanitaire à l'air intérieur" ("*bijdrage van kruipruimtelucht in woonkamerlucht*" ou "*kruipruimtelucht bijdrage*"). Cette dénomination sera reprise dans ce chapitre.

⁴ Veerkamp, W. ten Berge, W. Hazard Assessment of Chemical Contaminants in Soil. ECETOC Technical Report 40 revised. Appendix III. ECETOC. Bruxelles. Avril 1992

⁵ Les nombres respectifs de vides sanitaires et de caves de sont pas précisés dans Fast *et al.* (1987). L'introduction évoque p I des "caves ou vides sanitaires". Par la suite, notamment dans les descriptions des lieux de mesure et des résultats associés (résumés p 39-44 et "études de cas" p 57-119), dans les nombreux tableaux de résultats, et dans les discussions sur les transferts, il est fait mention exclusivement -et de façon cohérente- de vides sanitaires, sauf dans un des 12 groupes d'habitations étudiées. Ce groupe (site "Vuilstort") comporte 11 habitations, dont au moins une avec un vide sanitaire contaminé et une (désignée "V-1") avec une cave contaminée. Pour les 9 autres, il est question de "vide sanitaire ou cave" dans le résumé p 43, mais de "vide sanitaire" dans l'étude de cas p 78, ce qui laisse une incertitude quant à la présence d'autres caves. En outre, p78, la cave en "V-1" est présentée comme une exception ("comporte cependant une cave"). Ces observations indiquent que le nombre de caves sur l'ensemble des 97 habitations est

- **Principe: mesure par gaz traceur (SF₆):** le gaz SF₆ est libéré dans le vide sanitaire, puis mesuré au cours du temps dans le vide sanitaire et dans l'air intérieur. Fbi est alors égal au rapport des concentrations entre l'air intérieur et l'air du vide sanitaire. Le taux de ventilation Vv s'obtient à partir de la courbe de décroissance des teneurs en gaz traceur dans l'air du vide sanitaire (Hulot *et al.*, 2003).
- Nombreuses variations dans les caractéristiques locales (reprises dans le Tableau 2 ci-après).

Les résultats rapportés par Fast *et al.* (1987; tableau 5.3.2 et texte p 47-48), sont reproduits dans le Tableau 1 ci-dessous.

	Vv	fbi		
	Tous planchers	Plancher béton	Plancher bois	
Nombre de mesures	88	82	~ 73 ⁶	~ 9
Unité de mesure	h ⁻¹	%		
Minimum	0,03	0		
Maximum	7,4	68,5	52,2	68,5
Moyenne	1,25	10,7	9,6	19,3
Médiane	1	15,3		
95^e centile		39,4		
déviatiion standard	1,57	12,3		
Coefficient de variation	125	115		
Remarque			Valeurs > 50 % moins fréquentes	

case vide: non communiqué.

Tableau 1: Taux de ventilation Vv du vide sanitaire et contributions fbi de l'air du vide sanitaire à l'air intérieur rapportés par Fast et al. (1987)

Ces résultats mettent en évidence une importante dispersion des contributions fbi et des taux de ventilation Vv mesurés. Les mesures ont été répétées dans le temps sur 12 habitations (Fast *et al.* 1987, p I). Les variations dans le temps ne sont pas documentées en détail. Les auteurs mentionnent toutefois des variations observées importantes avec le temps (p I), qui les ont amenés à différencier certains calculs faisant intervenir fbi selon la moyenne et le maximum mesurés sur les différents lieux (p 38).

Fast *et al.* (1987, p 47) signalent différents facteurs susceptibles d'influencer les taux de ventilation Vv du vide sanitaire et les contributions fbi de l'air du vide sanitaire à l'air intérieur mesurés. Ils sont reproduits dans le Tableau 2 ci-après.

vraisemblablement limité à 1, et au maximum de 9. En outre, pour la cave en "V-1", aucun résultat faisant intervenir la contribution mesurée de l'air du vide sanitaire à l'air intérieur n'est reproduit ou mentionné, contrairement aux autres études de cas, ce qui laisse la possibilité que cette contribution n'ait pas été obtenue. En l'absence de précision complémentaire, la dénomination de Fast *et al.* (1987) ("contribution de l'air du vide sanitaire à l'air intérieur") laisse également la possibilité que cette mesure n'ait pas été incorporée à la distribution statistique donnée pour fbi (et Vv).

⁶ reconstitué d'après les moyennes respectives et le nombre total de mesures.

	Vv	fbi
Facteurs dépendants du temps	Conditions climatiques	
	Direction du vent	Réglage de la ventilation de l'habitation
Facteurs dépendants de l'habitation	Nombre et taille des ouvertures de ventilation [du vide sanitaire]	Ventilation du vide sanitaire
	Type et état du plancher entre l'habitation et le sous-sol ou le vide sanitaire	
		Nombre d'ouvertures ou de fissures dans le plancher

Tableau 2: Facteurs susceptibles d'influencer les taux de ventilation Vv du vide sanitaire et les contributions fbi de l'air du vide sanitaire à l'air intérieur mesurés, d'après Fast et al. (1987)

Fast *et al.* (1987) ne précisent pas le détail des données par lieu de mesure, ce qui empêche toute réexploitation spécifique sur l'un ou l'autre facteur. Toutefois, deux des facteurs concernant fbi y sont analysés (p 47):

- Ventilation du vide sanitaire: une corrélation positive significative ($p < 0,017$) a été observée entre les taux de ventilation du vide sanitaire et la contribution fbi de l'air du vide sanitaire à l'air de l'habitation: environ 27% de la variation dans la contribution fbi peut ainsi être attribuée à la variation du taux de ventilation. Les auteurs proposent les pistes d'explication suivantes:
 - En cas d'ouvertures importantes dans le plancher, ces ouvertures contribueraient simultanément à une augmentation de la ventilation du vide sanitaire et de la contribution de l'air du sous-sol ou du vide sanitaire à l'air de l'habitation;
 - Lors d'épisodes venteux, augmentation simultanée de l'apport via le plancher et de la ventilation du vide sanitaire, conjuguée à un réglage au minimum de la ventilation de l'air intérieur par les habitants⁸.
- Types de planchers: certains planchers étaient en bois, d'autres en béton. Fast *et al.* (1997) signalent une différence significative ($p < 0,01$) entre les deux distributions de fbi correspondantes. Les caractéristiques de ces deux distributions rapportées par Fast *et al.* (p 47-48) sont reprises dans le Tableau 1 ci-dessus.

A ce stade, la consultation de Fast *et al.* (1987) conduit aux conclusions suivantes:

1. Les taux de ventilation Vv du vide sanitaire et les contributions fbi de l'air du vide sanitaire à l'air intérieur mesurés concernent essentiellement des vides sanitaires. Aucun élément de ce document ne justifie l'extrapolation à un sous sol.

⁷ p: probabilité que l'hypothèse avancée soit fausse.

⁸ Hypothèse d'explication INERIS: En épisode venteux, on fermera les fenêtres par exemple. Ainsi, la ventilation de l'air intérieur n'augmentera pas autant que l'entrée d'air du vide sanitaire à travers le plancher, d'où une augmentation de fbi.

2. Ces valeurs concernent essentiellement des planchers en béton, ce qui justifie l'ajustement proposé par HESP pour des planchers en bois;
3. **Les valeurs retenues dans CSOIL et HESP correspondent aux moyennes mesurées. Elles sont non-conservatoires par rapport aux médianes, donc non protectrices pour plus de 50% des habitations mesurées**, même, pour fbi, pour le cas le plus courant d'un plancher en béton (sous estimation d'environ 50% par rapport à la médiane).

2.4 CONTROLE ULTERIEUR DU FACTEUR DE DILUTION EMPIRIQUE HOLLANDAIS

La deuxième étude nationale hollandaise sur le radon dans les habitations a fourni des résultats complémentaires de mesure de la dilution entre le vide sanitaire et l'air intérieur et de renouvellement de l'air dans le vide sanitaire (Stoop *et al.*, 1998).

Elle a concerné des maisons construites entre 1985 et 1993 (p 5). Les fondations soumises à des mesures sont exclusivement des vides sanitaires: aucune mesure dans un autre type de fondations n'est évoquée.

Des gaz traceurs de la famille des perfluorocarbones (PFT) ont été utilisés pour mesurer des flux de circulation d'air dans les maisons: du perfluorométhylcyclohexane (PMCH) a été émis dans le *living*, et du perfluorodiméthylcyclohexane (PDCH) dans le vide sanitaire.

Les résultats rapportés par Stoop *et al.* (1998) et pertinents pour la présente étude sont reproduits en première partie du Tableau 3 ci-dessous.

	Paramètre	Symbole	Unité	Moyenne	Déviat ion standard	Nombre de mesures
Stoop et al, 1998	Flux total dans le vide sanitaire	Fvs	m3/h	41,5	35,1	791
	Flux total dans le living	Fl	m3/h	85,9	45,9	1253
	Flux du vide sanitaire vers le living	Fvs_l	m3/h	6	6,3	728
	Volume du vide sanitaire	Bv	m3	60	NC	NC
	Taux de ventilation du vide sanitaire	Vv	h-1	1,1	1,2	NC
Calculs INERIS	Facteur de dilution du vide sanitaire vers le living (1ère estimation)	fbi	%	7,0		
	Taux de ventilation du vide sanitaire (première estimation d'après flux et volumes)	Vv	h-1	0,69		
	Erreur due au travail sur moyennes, sur Vv	-	%	59		
	Facteur de dilution du vide sanitaire vers le living (1ère estimation+erreur due au travail sur moyennes sur Vv)	fbi	%	11,1		

NC: non communiqué

Tableau 3: Résultats des mesures de ventilation rapportés par Stoop et al. (1998), et calculs INERIS associés

L'importante variation des valeurs des taux de ventilation Vv du vide sanitaire est imputée par Stoop *et al.* (1998) à la mesure "imprécise" du volume du vide sanitaire.

Stoop *et al.* (1998) n'ont pas documenté directement le taux de dilution entre le vide sanitaire et l'air intérieur.

Pour une maison donnée, ce taux est égal au rapport du flux du vide sanitaire vers l'air intérieur, sur le flux total dans l'air intérieur. A partir des données rapportées par Stoop *et al.* (1998), seule une première estimation de fbi est possible, sur la base de la division de la moyenne de ces valeurs (première ligne des calculs INERIS dans le Tableau 3)⁹. Toutefois, la moyenne des fractions est supérieure à la fraction des moyennes. Aussi cette première estimation donne-t-elle un résultat par défaut. Cette erreur est illustrée dans le Tableau 3 à travers la comparaison d'une part du taux de renouvellement Vv calculé par division des moyennes (deuxième ligne des calculs INERIS), avec la moyenne effectivement calculée et rapportée par Stoop *et al.* (dernière ligne): l'estimation s'avère sous-évaluée de 60%. A titre indicatif, une correction correspondante est appliquée au calcul du taux de dilution fbi (dernière ligne des calculs INERIS). On aboutit ainsi à un facteur de dilution compris entre 7 et 11%. Cette estimation est entachée d'un biais supplémentaire (non quantifié ici), du fait de la non correspondance complète entre les mesures des différents flux: les nombres de mesures sont inégaux.

En outre, pour 676 habitations, il a été mesuré à la fois les concentrations en radon dans le vide sanitaire et l'air intérieur, et les flux d'air dans et entre ces deux compartiments. La contribution moyenne de l'air du vide sanitaire à la concentration en radon dans le living (en Bq/m³) en a été déduite. De la même façon qu'au paragraphe précédent, on peut reconstituer une première estimation du taux de dilution entre le vide sanitaire et l'air intérieur, marquée par le même biais que précédemment de division des moyennes plutôt que de moyennation des quotients. La même correction indicative a été apportée. Les résultats correspondants de Stoop *et al.* et de l'INERIS sont reportés dans le Tableau 4 ci-dessous. Ils aboutissent à une estimation du taux de transfert entre le vide sanitaire et l'air intérieur, fbi, comprise entre 5,8 et 9,2%.

	Paramètre	Symbole	Unité	Moyenne	Erreur*	Nombre de mesures
Stoop et al, 1998	Concentration dans le living	Cl	Bq/m3	32	1,0	
	Contribution du vide sanitaire à la concentration dans le living	Cl vs	Bq/m3	4,4	0,2	726
	Concentration dans le vide sanitaire	Cvs	Bq/m3	76	2,4	
Calculs INERIS	Facteur de dilution du vide sanitaire vers le living (1ère estimation)	fbi	%	5,8		
	Facteur de dilution du vide sanitaire vers le living (1ère estimation+erreur due au travail sur moyennes sur Vv)	fbi	%	9,2		

*marge d'erreur statistique

Tableau 4: Résultats des mesures de concentrations et de contributions rapportés par Stoop et al. (1998), et calculs INERIS associés

⁹ Otte *et al.* (2001) effectuent ce calcul dans le cadre du contrôle des paramètres du modèle CSOIL: ils notent que "la contribution moyenne du flux depuis le vide sanitaire vers le living au flux total dans le living était de 0,07 (6 m³/h sur 85 m³/h) (Stoop *et al.*, 1998)." Ils proposent *in fine* de maintenir la valeur de fbi à 0,1 dans le modèle CSOIL, compte-tenu des moyennes mesurées rapportées par Fast *et al.* (1987) et Stoop *et al.* (1998) et du fait que la dernière référence concerne des maisons neuves avec des planchers en béton.

Seul un retour aux résultats initiaux des mesures de ventilation par gaz traceur introduit dans le vide sanitaire permettrait de préciser le taux de dilution fbi mesuré dans cette étude. **Toutefois, les données agrégées rapportées par Stoop et al. (1998) confirment les ordres de grandeur de Fast et al. (1987) pour fbi et Vv. Ces données et celles rapportées par Fast et al. (1987) conduisent toutefois Otte et al. (2001) à ramener la valeur de Vv dans le modèle CSOIL à 1,1/h au lieu de 1,25/h, ce qui est plus pénalisant.**

2.5 REMARQUES COMPLEMENTAIRES SUR LA MESURE DU TRANSFERT DE VAPEURS VERS L'AIR INTERIEUR

Dans l'étude de Fast et al. (1987), les teneurs en 45 composés organiques volatils (COV) ont également été mesurées dans l'air du vide sanitaire, dans l'air intérieur de l'habitation et dans l'air l'extérieur. Dans 7 lieux, une contribution significative de la pollution du sol à l'air du sous-sol ou du vide sanitaire a pu être mise en évidence (p 45). Ces 7 constructions présentent d'importantes différences sur des paramètres tels que le type de plancher, le style de construction, la taille. Quatre des 7 lieux ont fait l'objet de mesures répétées. Ces dernières ont révélé des variations très importantes dans le temps des teneurs mesurées en intérieur. Les auteurs signalent comme cause possible de ces variations, des variations du niveau des eaux souterraines, des conditions climatiques, et de la ventilation de l'habitation.

Ceci confirme la nécessité, en cas de surveillance de l'air intérieur, de prévoir plusieurs campagnes et de documenter soigneusement les conditions de mesure (variation de la pression atmosphérique, vitesse du vent, température ambiante, conditions de ventilation et de chauffage, ...).

Les auteurs n'ont pas exploité ces mesures de polluant pour la déduction d'un facteur de transfert entre le sous-sol/vide sanitaire et l'air intérieur.

En revanche, pour quelques lieux présentés en étude de cas, une "contribution du [sous-sol/] vide sanitaire aux concentrations dans l'air intérieur" est estimée pour chacun des composés analysés, selon la formule suivante (p 38):

1. concentration dans l'air du sous-sol / vide sanitaire
2. éventuellement¹⁰ soustraite de la concentration dans l'air extérieur;
3. multipliée par la contribution du vide sanitaire à l'air intérieur (mesurée avec le gaz traceur SF₆), valeur moyenne ou¹⁰ maximale sur les différentes campagnes réalisées;
4. rapportée à la concentration dans l'air intérieur.

Avec ce mode de calcul, si les concentrations dans l'air intérieur étaient uniquement dues à l'air du vide sanitaire, la contribution calculée du sous-sol / vide sanitaire aux concentrations dans l'air intérieur devrait être de 100%.

¹⁰ Différentes modalités de calcul sont énoncées p 38. Les modalités effectivement utilisées ne sont pas précisées pour les différents cas avec les tableaux de résultats présentés en annexe du document.

Les valeurs effectivement obtenues présentent pour chaque lieu une dispersion considérable entre les substances¹¹: les concentrations dans l'air intérieur sont dues pour une part importante à d'autres sources que l'air du vide sanitaire, même sur un site pollué.

En outre, sur une étude de cas ("Garage 1 et 2", 7 habitations; p 92-93 et Tableau 10.5), les concentrations mesurées dans l'air intérieur sont rapportées à celles mesurées dans le vide sanitaire, à la fois pour toutes les substances organiques analysées, pour une sélection de substances moins courantes, et pour le gaz traceur SF₆. Fast *et al.* (1987) observent que sur les moyennes des concentrations par lieu, les rapports des substances organiques ne correspondent jamais avec ceux du gaz traceur: ils sont systématiquement supérieurs (16 à 35% sur la moyenne des substances et 5 à 38% pour la sélection de substances, contre <4 à 17% pour le gaz traceur), ce qui indique l'existence d'une émission dans l'habitation elle-même. Fast *et al.* rapportent qu'au sein d'une habitation, les rapports des différentes substances varient fortement, aussi bien pour la moyenne que pour la sélection des substances. Fast *et al.* (1997) considèrent que ce dernier résultat n'est "pas étonnant" compte tenu de l'observation précédente.

Une leçon pratique de ces résultats est que **la mesure de l'air intérieur est un moyen à manier avec une extrême précaution pour quantifier l'impact éventuel d'une pollution des sols sur l'air intérieur.**

3. MODELISATION AU MOYEN DE VOLASOIL

Le modèle hollandais VOLASOIL (Waitz *et al.*, 1996) est le complément de CSOIL pour le transfert de vapeurs de composés volatils.

Dans ce modèle, un flux de convection à travers le plancher des bâtiments est pris en compte, dû à une différence de pression entre l'intérieur des bâtiments et le sol. S'appuyant sur les descriptions américaines de Nazaroff et Johnson et Ettinger, Waitz *et al.* (1996) attribuent cette différence de pression au chauffage et à l'action des vents sur les murs¹². Le flux d'air est évalué à partir des perméabilités de fissure et de porosité des matériaux traversés (et de leur diffusivité), au moyen des équations de mécanique des fluides et de leurs développements donnés par VOLASOIL.

La documentation de référence du modèle VOLASOIL (Waitz *et al.*, 1996), signalant l'importante limitation de l'application du facteur fbi (p 45/189), prévoit explicitement (p 66-71/189) la modélisation du transfert de vapeurs du vide sanitaire vers l'habitation au moyen du modèle VOLASOIL. Cette modélisation

¹¹ répartition sur tous les intervalles suivants:

- [0%;122%] pour un lieu (habitation G6, Tableau 5.3.5), avec un mode de calcul interdisant apparemment des valeurs négatives (nombreuses valeurs nulles sans valeur négative; cela correspondrait à la formule ci-dessus sans soustraction de l'air extérieur);
- [-45% ; +33%] pour un autre (Gas 2, Tableau 5.5.5);

[-100%;100%] pour un autre (Zelling 3, Tableau 5.11.7), avec un mode de calcul inconnu interdisant apparemment des valeurs absolues supérieures à 100, mais permettant de fortes valeurs négatives.

¹² En France (au moins), il faudrait ajouter la ventilation forcée dans les maisons récentes.

aboutit¹³ à un facteur de dilution de 24 environ avec la paramétrisation suivante: lieu de vie de hauteur 2,5 m; ventilé à 0,5 /h; transfert à travers la dalle de béton de "qualité normale" (paramétrisation VOLASOIL) d'épaisseur 15 cm, sans voie de circulation préférentielle, différence de pression vis-à-vis du sous-sol ou du vide sanitaire: 2 Pa (VOLASOIL: Waitz *et al.*, 1996). Les paramètres numériques cités interviennent de façon linéaire. Des bétons de "mauvaise qualité" et de "bonne qualité" (paramétrisation VOLASOIL) aboutiraient respectivement à des facteurs de dilution de 1 (pas de dilution notable) et de 2400. Une paramétrisation du béton en "qualité normale" apparaît *a priori* conservatoire pour une construction à venir¹⁴.

Ces considérations valent uniquement sous réserve d'une absence de voie de circulation préférentielle du sous-sol ou du vide sanitaire aux lieux de vie sus-jacents (vide ordure¹⁵, canalisations, gaines de câbles, ...), ce qui serait une contrainte à inscrire en cas de calcul d'objectifs de dépollution sur cette base. Dans le cas contraire¹⁶, à notre connaissance, on ne dispose pas de valeur de fbi pour un sous-sol qui soit étayée par une démarche scientifique. Seules des appréciations "de bon sens" peuvent être utilisées: il serait irréaliste de considérer que la totalité (ou même la moitié¹⁷) de l'air de la pièce vienne du vide sanitaire ou du sous-sol. De telles appréciations comporteraient forcément une part d'arbitraire.

En outre, le modèle VOLASOIL n'a pas fait l'objet d'une validation expérimentale. Les valeurs de la densité et de la taille des orifices dans la dalle de béton, qui déterminent la perméabilité au flux convectif, ne sont pas justifiés dans la documentation de référence du modèle (Waitz *et al.*, 1996), ne sont pas accessibles à la mesure, et apparaissent donc hautement incertaines.

4. MODELISATION PAR JOHNSON & ETTINGER

Le modèle recommandé par l'US EPA, Johnson & Ettinger (1991), prend également en compte la convection (et la diffusion) des vapeurs à travers le plancher des lieux de vie.

Toutefois, il fait intervenir la perméabilité du sol immédiatement sous ce plancher. Dans le cas d'un plancher sur sous-sol ou sur vide sanitaire, cette perméabilité est

¹³ modélisation INERIS non présentée ici.

¹⁴ Ce point peut toutefois être discuté pour les expositions futures, dans 30 ou 70 ans. La présente appréciation veut s'inscrire dans une approche "raisonnable", compte-tenu du fait que les modélisations effectuées concernent en particulier l'exposition à partir de la date la plus proche possible, avec une source non atténuée au départ. Cette appréciation pourrait être remise en cause pour des modélisations sortant de ce cadre.

¹⁵ Les vides-ordures ne sont toutefois pas pratiqués dans les constructions récentes.

¹⁶ Qui serait *a priori* le plus courant dans les EDR: dans les immeubles urbains avec parking souterrain, le sous-sol est un lieu clé de passage et de raccordement de câbles et conduites. Une étanchéification de ces dispositifs vis-à-vis de l'air du sous-sol semble peu accessible dans l'état de l'art actuel de la construction, et pourrait s'avérer disproportionnée par rapport aux risques réels.

¹⁷ Même si un tel cas extrême a été rapporté par Fast *et al.* (1987) à partir d'un vide sanitaire et d'un plancher en béton.

quasi-infinie, ce qui conduirait à une absence de dilution: le modèle Johnson & Ettinger (1991) n'est pas applicable ici.

5. CONCLUSION

Les taux de ventilation V_v du vide sanitaire de 1,25/h et la contribution fbi de 10% de l'air de la fondation à l'air intérieur, appliqués dans les modèles HESP ou CSOIL et couramment utilisés dans les EDR en France, correspondent:

- à des mesures essentiellement à partir de vides sanitaires. Leur extrapolation à un sous sol resterait à justifier.
- à des moyennes mesurées. Elles ne sont pas protectrices pour plus de 50% des habitations mesurées, avec une sous estimation du transfert de l'ordre de 50% par rapport à la médiane pour fbi. En outre, les valeurs de fbi ou de V_v mesurées sont apparues extrêmement dispersées: des valeurs de 2 à 4 fois plus pénalisantes peuvent être rencontrées au 95^e centile.

Otte *et al.* (2001) proposent de ramener la valeur de V_v dans le modèle CSOIL à 1,1/h au lieu de 1,25/h, ce qui serait plus conservatoire.

La valeur de fbi de HESP et CSOIL s'avère deux fois plus conservatoire que celle issue d'une modélisation par VOLASOIL pour une construction "normale". Cette modélisation VOLASOIL vaut toutefois uniquement sous réserve d'une absence de voie de circulation préférentielle depuis le sous-sol ou le vide sanitaire vers les lieux de vie sus-jacents, ce qui serait une contrainte à inscrire en cas de calcul d'objectifs de dépollution établis sur cette base. En outre, le modèle VOLASOIL n'a pas fait l'objet d'une validation expérimentale, et présente des incertitudes importantes dans le calcul de fbi. Hors modélisation par VOLASOIL, à notre connaissance, on ne dispose pas de valeur de fbi pour un sous-sol qui soit étayée par une démarche scientifique. Seules des appréciations "de bon sens" peuvent être utilisées.

Face à ces incertitudes de l'évaluation, une solution de prévention pourrait être de dimensionner les mesures de mise en sécurité sur la base de contributions à l'air du rez-de-chaussée de 100% à partir d'un sous-sol (absence de dilution) et de 39% depuis un vide sanitaire (95^e centile de la distribution de Fast *et al.*, 1987). La mise en sécurité correspondante des bâtiments vis-à-vis du transfert de vapeur pourrait être recherchée par les moyens suivants:

- dispositions constructives pour des bâtiments nouveaux
 - membrane PEHD sous dalle et mise en dépression de l'air du sol sous-jacent¹⁸;
 - dallage en radier en fond de sous-sol/vide sanitaire;
- ventilation mécanique accrue et pérenne du sous-sol ou du vide sanitaire.

¹⁸ un doublage de ces deux mesures peut être recommandé, faute de validation de l'un ou l'autre dispositif pris isolément, et, pour la géomembrane, pour prévenir un déplacement des vapeurs (et des risques associés) vers les bâtiments voisins.

Enfin, l'expérience de Fast *et al.* (1987) montre que la mesure de l'air intérieur est un moyen à manier avec une extrême précaution pour quantifier l'impact éventuel d'une pollution des sols sur l'air intérieur. En cas de surveillance de l'air intérieur, il convient de prévoir plusieurs campagnes et de documenter soigneusement les conditions de mesure (variation de la pression atmosphérique, vitesse du vent, température, conditions de ventilation et de chauffage, ...).

6. REFERENCES

van den Berg R. (1994) Human exposure to soil contamination : a qualitative and quantitative analysis towards proposals for human toxicological intervention values (partly revised edition). National Institute of Public Health and Environmental Protection (Rijkinstituut Voor Volksgezondheid en milieu), Bilthoven, The Netherlands. Report 755201011. April 1991/January 1994.

ECETOC, 1990. Poels, C.L.M., Gruntz U, Isnard P, Riley D., Piteller. M, ten Berge W., Veerkamp W., Bontinck W.J.. ECETOC technical report nr. 40, Hazard Assessment of Chemical Contaminants in Soil.

Fast, T.J., Kliest, en H., van de Wiel, 1987, De bijdrage van bodemverontreiniging aan de verontreiniging van de lucht in woningen. Rapport nr. 6 in de publikatiereeks Milieubeheer, VROM, Leidschendam.

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. Updated Version 14 mai 2003. www.ineris.fr.

INERIS, 2002. Evaluation Détaillée des Risques pour la santé. Fiches techniques de présentation des modèles d'exposition aux sols pollués. HESP (Human Exposure to Soil Pollutants). Ministère de l'Écologie et du Développement Durable. G. Heuzé. Octobre 2002. INERIS-DRC-02-41200/DESP-R30a.

INERIS (2003). Retour d'expérience sur la gestion des sites pollués en France. Réponses aux questions reçues par l'INERIS d'octobre 2000 à fin juillet 2003. Rapport d'avancement - Version finale. Ministère de l'Écologie et du Développement Durable. B. Hazebrouck - C. Hulot. INERIS-DRC-03-41200/DESP-R02c. 23 Décembre 2003.

Johnson et Ettinger, 1991. Model for subsurface vapor intrusion into buildings. Users Guide US EPA 2003.
http://www.epa.gov/oerrpage/superfund/programs/risk/airmodel/johnson_ettinger.htm.

MATE, 2000-2002: Ministère Français de l'Environnement. Gestion des sites potentiellement contaminés. La visite préliminaire - Le Diagnostic initial – L'évaluation simplifiée des risques. Version 2. DPPR, INERIS, BRGM. BRGM Editions. Mars 2000. Annexe 5 de décembre 2002.

Otte P.F., J.P.A. Lijzen, J.G. Otte, F.A. Swartjes and C.W. Versluijs (2001). Evaluation and revision of the CSOIL parameter set. Proposed parameter set for human exposure modelling and deriving Intervention Values for the first series of compounds. RIVM Report 711701021. March 2001.

Shell Global Solutions 1995. The concepts of HESP. Reference Manual, Human Exposure to Soil Pollutants, version2.10b. Jan 1995.

Stoop, P., P. Glastra, Y. Hiemstra, L. de Vries and J. Lembregts (1998): Results of the second Dutch national survey on radon in dwellings. RIVM, Bilthoven. RIVM Report 610058006.

Swartjes, 1995: communication personnelle.

Veerkamp, W., ten Berge, W., 1994. The concepts of HESP. Reference Manual, Human Exposure to Soil Pollutants, version2.10a. Shell Internationale Petroleum Maatschappij, The Hague, 1 September, 1994.

Waitz *et al.*, 1996. The VOLASOIL risk assessment model based on CSOIL for soils contaminated with volatile compounds. M.F.W. Waitz; J.I. Freijer; F.A. Swartjes. May 1996. RIVM. Report n° 7581001. <http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/715810014.pdf>