

RAPPORT D'ÉTUDE
N°DRC-11-115732-09274C

29/02/2012

**Réutilisation des terres excavées sur des
projets d'aménagement : élaboration de seuils
vis-à-vis des risques sanitaires**

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |

Réutilisation des terres excavées sur des projets d'aménagement : élaboration de seuils vis-à-vis des risques sanitaires

Rapport réalisé pour le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL), dans le cadre des programmes d'appui DRC01 et DRC15.

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Aurélie DROISSART, Guillaume GAY, Benoît HAZEBROUCK, Corinne HULOT (INERIS) ; Céline BLANC (BRGM).

PRÉAMBULE

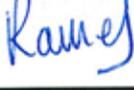
Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

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 équivalents 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	Céline BOUDET	Martine RAMEL
Qualité	Responsable de l'unité Comportement des Contaminants dans les Sols et Matériaux, Direction des Risques Chroniques	Responsable de l'unité Impacts sanitaires et Expositions, Direction des Risques Chroniques	Responsable du pôle RISK "Risque et technologies durables", Direction des Risques Chroniques
Visa			

Le travail présenté ici a été effectué en concertation notamment avec le Groupe de Travail Technique « réutilisation des terres excavées en projets d'aménagement et en techniques routières » composé de :

- F. Lefevre, P. Bodenez (DGPR- BSS,MEDDTL),
- P. Vaillant (DGPR- SDPD, MEDDTL),
- C. Blanc, D. Darmendrail, G. Boissard, C. Merly, P. Piantone, S. Colombano (BRGM),
- B. Hazebrouck (INERIS),
- P. Bajeat (ADEME),
- C. de la Hougue, J.L. Sévêque, J.M. Brun (UPDS),
- T. Blondel, E. Vernus (UCIE),
- G. Groizeleau, S. Rutard (FNTP),
- P. Clottes (Communauté Urbaine du Grand Lyon),
- E. Maheut (AFTRP),
- V. Douard, P. Charbonnier, O. Piguët (AFEP),
- A. Fauchas, C. Blassenac (CETE IDF),
- M. Heulot (FFA),
- F. Verhee (USIRF),
- C. Caroly (UIC),
- M. Hiblot, M. Tarnot, F. Fouilland (UNED),
- R. Bodet, B. Huvelin (UNPG).

RESUME

Le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL) a missionné le BRGM et l'INERIS dans le cadre de leurs programmes d'appuis respectifs, pour élaborer un guide méthodologique pour la valorisation des terres excavées en technique routière et sur des projets d'aménagement.

Ce guide prévoit certaines limitations d'usage, et deux types d'outil à appliquer pour vérifier la possibilité de réutilisation de terres excavées dans un projet d'aménagement :

- pour la protection de la ressource en eau, un outil de modélisation des impacts sur les eaux souterraines (HydroTex) ;
- pour la protection de la santé des personnes, des valeurs seuils génériques de réutilisation des terres (concentrations dans les terres excavées).

Dans ce contexte, l'INERIS a élaboré, en concertation avec le Groupe de Travail Technique « terres excavées », des propositions de valeurs seuils basées sur une démarche d'évaluation des risques sanitaires pour différents scénarios génériques de réutilisation des terres. L'INERIS met en outre à disposition le fichier de calcul Excel[®] utilisé, pour assurer la transparence de l'élaboration de ces valeurs seuils génériques et pour en faciliter une éventuelle application à d'autres substances ou à d'autres configurations de site.

Le présent rapport décrit et discute la démarche suivie et les résultats obtenus dans ce travail d'élaboration de seuils vis-à-vis des risques sanitaires. Cette démarche et ces résultats ont été présentés et discutés au sein du Groupe de Travail Technique « terres excavées ».

Sur cette base, le ministère du Développement Durable a fixé des seuils de gestion ajustés compte-tenu des retours du Groupe de Travail Technique et du Groupe de Travail plénier « terres excavées ». Ces seuils sont reportés dans le tableau ci-dessous :

En mg/kg MS	VS1 : Valeurs seuils sous bâtiment (bureau, industriel, commercial)	VS2 : Valeurs seuils pour réutilisation sous couverture*
C ₅ -C ₁₀	40 ***	400 ***
C ₁₀ -C ₄₀	50 ***	500 ***
Benzène	0,05	0,3
Somme TEX (Toluène, Ethylbenzène, Xylènes)	2,5 ***	6 ***
Naphtalène	0,05	1,5
Tétrachloroéthène	0,2	1
Trichloroéthène	0,9	5
cis-Dichloroéthène	0,3	2
Chlorure de vinyle	0,3	1,5
PCB (7)	0,1 **	0,1 **
Phénols et crésols (indice phénol)	8 ***	20 ***

* Couverture : revêtement bitumineux ou béton, ou terre végétale (30 cm).

PCB (7): PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153 et 180

** Estimation haute (90^{ème} centile) d'un bruit de fond urbain.

*** Valeurs ajustées par le ministère du Développement Durable compte-tenu des retours du Groupe de Travail Technique et du Groupe de Travail Plénier « terres excavées ».

SOMMAIRE

1. CONTEXTE ET OBJECTIF	11
2. DEMARCHE	12
3. SCHEMA CONCEPTUEL.....	13
4. SELECTION DES SUBSTANCES.....	15
5. MODELISATION DES EXPOSITIONS ET DES NIVEAUX DE RISQUES	17
5.1 Modélisation des transferts, des expositions, des niveaux de risques	17
5.2 Caractéristiques des voies de transfert	24
5.2.1 Caractéristiques des sols et matériaux	24
5.2.2 Conditions de ventilation et de pressions, et de fréquentation des lieux..	28
5.3 Données physico-chimiques des substances.....	29
5.4 Choix des Valeurs Toxicologiques de Référence	29
6. CHOIX DE NIVEAUX DE RISQUE LIMITES ET CALCUL DE TENEURS LIMITES.....	30
6.1 Choix de niveaux de risque limites	30
6.2 Calcul de teneurs limites au regard du risque sanitaire.....	30
7. PROPOSITION ET FIXATION DE VALEURS SEUILS	33
8. BILAN DES INCERTITUDES	36
9. REFERENCES CITEES.....	37
10. LISTE DES ANNEXES	40

Liste des annexes

Annexe 1 : Modèles de transfert, d'exposition, et de risque

Annexe 2 : Caractéristiques des voies de transfert

Annexe 3 : Données physico-chimiques et toxicologiques des substances

Annexe 4 : Adaptation des teneurs limites calculatoires en valeurs seuils

Annexe 5 : Présentation des feuilles de calcul

Annexe 6: Fichier de calcul (fichier électronique Excel®)

Liste des figures

Figure 1 : Scénarios de réutilisation des terres excavées	14
Figure 2: Transport convectif d'air vers l'intérieur d'un bâtiment (Waitz et al, 1996)	18
Figure 3: Modèle de la boîte pour la dispersion dans l'air extérieur.....	21

Liste des tableaux

Tableau 1 : Scénarios étudiés de réutilisation des terres excavées et d'exposition des personnes.....	15
Tableau 2 : Sensibilité des teneurs limites calculées vis-à-vis des variantes de VOLASOIL/CSOIL utilisées.....	20
Tableau 3 : Approximations marquantes du modèle utilisé	23
Tableau 4 : Caractéristiques retenues pour les sols.....	24
Tableau 5 : Approximations ou incertitudes marquantes de la paramétrisation des sols	26
Tableau 6 : Sensibilité des concentrations limites calculées vis-à-vis de la foc et de la perméabilité du sol source.....	27
Tableau 7 : Conditions de ventilation des bâtiments et de fréquentation des différents lieux	28
Tableau 8 : Conditions de dispersion des vapeurs en extérieur	29
Tableau 9 : Ecart de diffusivités, transferts et teneurs limites, pour une couverture de parking bitume vis-à-vis d'une couverture de terre végétale...	31
Tableau 10 : Concentrations limites calculées dans les terres excavées au regard du risque sanitaire.....	32
Tableau 11 : Valeurs seuils proposées intégrant les choix du GTT « terres excavées »	34

GLOSSAIRE

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AFEP	Association Française des Etablissements Privées
AFSSET	Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail, maintenant ANSES
AFTRP	Agence Foncière et Technique de la Région Parisienne
Al EC5-EC6	Coupe d'hydrocarbure aliphatique de nombre équivalent de carbones compris entre 5 inclus et 6 inclus
Ar >EC10-EC12	Coupe d'hydrocarbure aliphatique de nombre équivalent de carbones compris entre 10 exclu et 12 inclus
ANSES	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
ATSDR	<i>Agency for Toxic Substances and Disease Registry</i> (États-Unis)
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BTEX	Benzène, toluène, éthylbenzène, xylènes
CCME	Conseil canadien des ministres de l'environnement
CETE	Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement
cis-DCE	1,2-Dichloroéthylène-cis
COHV	Composés OrganoHalogénés Volatils
CT	Concentration Tolérable
CV	Chlorure de vinyle
EC	Nombre Equivalent de Carbones (cf. note 3 p 16)
ERI	Excès de Risque Individuel
ERU	Excès de Risque Unitaire
FFA	Fédération Française de l'Acier
FNTTP	Fédération Nationale des Travaux Publics
GTT	Groupe de Travail Technique
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
HCT	Hydrocarbures Totaux
ICPE	Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
INERIS	Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
ISDI	Installations de stockage de déchets inertes
MEDDTL	Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement
OEHHA	<i>Office of Environmental Health Hazard Assessment</i> (EPA de Californie)
OMS	Organisation Mondiale de la Santé

PCB	PolyChloroBiphéniles
PCE	Perchloroéthylène (tétrachloroéthylène)
PVL	Pas de valeur limite
QD	Quotient de Danger
RfC	<i>Reference Concentration</i> (= Concentration Tolérable CT)
RIVM	<i>Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu</i> (Institut national Hollandais pour la santé publique et l'environnement)
TCE	Trichloroéthylène
TPHCWG	<i>Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group</i>
UCIE	Union des Consultants et Ingénieurs en Environnement
UIC	Union des Industries Chimiques
UNED	Union Nationale des Exploitants des Déchets
UNPG	Union Nationale des Producteurs de Granulats
UPDS	Union des Professionnels de la Dépollution des Sols
US EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i> (États-Unis)
USIRF	Union des Syndicats de l'Industrie Routière Française
VGAI	Valeur Guide Air Intérieur (AFSSET)
VTR	Valeur toxicologique de référence
ZAC	Zone d'Aménagement Concerté

1. CONTEXTE ET OBJECTIF

Les différents acteurs français de l'aménagement du territoire et du renouvellement urbain, qu'ils soient institutionnels ou privés, sont confrontés à la difficulté de gestion des terres excavées.

Les lois Grenelle I et II ont mis en avant l'objectif de réduire la production de déchets et d'en favoriser la valorisation et le recyclage.

Pour préciser des règles et des méthodes pour la réutilisation durable des terres dans des conditions respectueuses de la santé humaine et de l'environnement, et fournir ainsi aux différents acteurs un cadre commun et directement applicable, le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL) a missionné le BRGM et l'INERIS dans le cadre de leurs programmes d'appuis respectifs, pour élaborer un guide méthodologique¹ pour la valorisation des terres excavées en technique routière et sur des projets d'aménagement. La réalisation de ce guide méthodologique s'appuie sur différents groupes de travail constitués d'un large panel d'acteurs du domaine (associations professionnelles, association de protection de l'environnement, aménageurs, avocats...).

Cette méthodologie vise la protection de la santé des personnes fréquentant les sites de réutilisation des terres, et de la ressource en eau. Il prévoit certaines limitations d'usage, et deux types d'outil à appliquer pour vérifier la possibilité de réutilisation de terres excavées dans un projet d'aménagement :

- pour la protection de la ressource en eau, un outil de modélisation des impacts sur les eaux souterraines, HydroTex (Boissard *et al.*, 2012) ;
- pour la protection de la santé des personnes, des valeurs seuils génériques (concentrations dans les terres excavées).

Dans ce contexte, le MEDDTL a chargé l'INERIS :

- de proposer, en concertation avec le Groupe de Travail Technique (GTT) « terres excavées », des valeurs seuils pour les terres excavées qui soient basées sur une démarche d'évaluation des risques sanitaires pour différents scénarios génériques de réutilisation des terres,
- et de mettre à disposition le fichier de calcul Excel[®] utilisé, pour assurer la transparence de l'élaboration de ces valeurs seuils génériques et pour en faciliter une éventuelle application à d'autres substances ou à d'autres configurations de site.

Le présent rapport décrit et discute la démarche suivie et les résultats obtenus dans ce travail d'élaboration de valeurs seuils vis-à-vis des risques sanitaires. Cette démarche et ces résultats ont été présentés et discutés au sein du Groupe de Travail Technique « terres excavées ».

¹ Guide de réutilisation des terres excavées en technique routière et sur des projets d'aménagement, Rapport V4, BRGM/RP-60013-FR. Février 2012.

2. DEMARCHE

La démarche suivie pour l'élaboration des valeurs seuils de réutilisation de terres excavées s'inscrit dans le référentiel de gestion des sites et sols pollués défini par le Ministère du Développement Durable (MEDAD, 2007a, 2007b), appliqué à des scénarios génériques. Les valeurs seuils proposées sont fondées sur les étapes suivantes :

1. Elaboration d'un schéma conceptuel ;
2. Sélection des substances ;
3. Modélisation des expositions et des niveaux de risques ;
4. Choix de niveaux de risque limites et calcul de teneurs limites d'un point de vue sanitaire (calcul inverse) ;
5. Proposition de valeurs seuils, intégrant des notions de bruit de fond dans les sols et des choix de gestion concertés avec le GTT « terres excavées ».

Le GTT « terres excavées » a choisi, pour la simplicité des valeurs seuils et des procédures de suivi, de retenir des valeurs seuils exprimées uniquement en concentrations dans les sols. Les concentrations dans l'air du sol équivalentes aux teneurs limites calculées (avant aménagement final en valeurs seuils) sont reportées au chapitre 6.2.

L'évaluation des risques sanitaires réalisée ici reste relativement simplifiée, dans une optique proportionnée d'élaboration de seuils génériques. On a veillé à limiter dans la mesure du possible les biais, approximations et incertitudes les plus importants, à signaler ceux qui subsistent et à en apprécier les impacts sur les résultats. En particulier, concernant les valeurs d'entrée, on s'est appuyé, dans le cadre de cette étude, sur des données disponibles, en approfondissant certains points plus sensibles au besoin (avec l'aide du groupe de travail)², mais sans mener d'études bibliographiques spécifiques complètes.

De même, le fichier de calcul transmis se veut clair et transparent, mais n'est pas un outil optimisé en termes de convivialité. Un bureau d'étude pourra aisément intégrer dans ses propres feuilles de calcul les quelques équations spécifiquement introduites dans cette étude.

² Par exemple sur la fraction de carbone organique de sols non superficiels, sur la répartition des coupes d'hydrocarbures au sein de mélanges de référence, et sur le bruit de fond urbain en PCB dans les sols.

3. SCHEMA CONCEPTUEL

Les scénarios de réutilisation des terres excavées ont été choisis dans une optique de limitation des expositions (absence de terres en surface ou sous des bâtiments résidentiels) et de réalisme au regard des pratiques d'aménagement.

La réutilisation des terres excavées en projet d'aménagement a été retenue par le groupe de travail « terres excavées » pour deux scénarios (Figure 1 ci-dessous) :

- **sous bâtiment de bureaux ou** de locaux commerciaux et industriels ;
- **sous couverture** de terre végétale pour des aménagements paysagers, sous des revêtements de type parkings, chaussées,...dans le cadre de projets d'aménagements urbains.

La réutilisation hors site des terres excavées sur des terrains destinés à un usage résidentiel ou à la culture (potagers, vergers, ...), ainsi que sur des établissements dits sensibles au sens de la circulaire ministérielle du 8 février 2007, est exclue du champ d'application du guide.

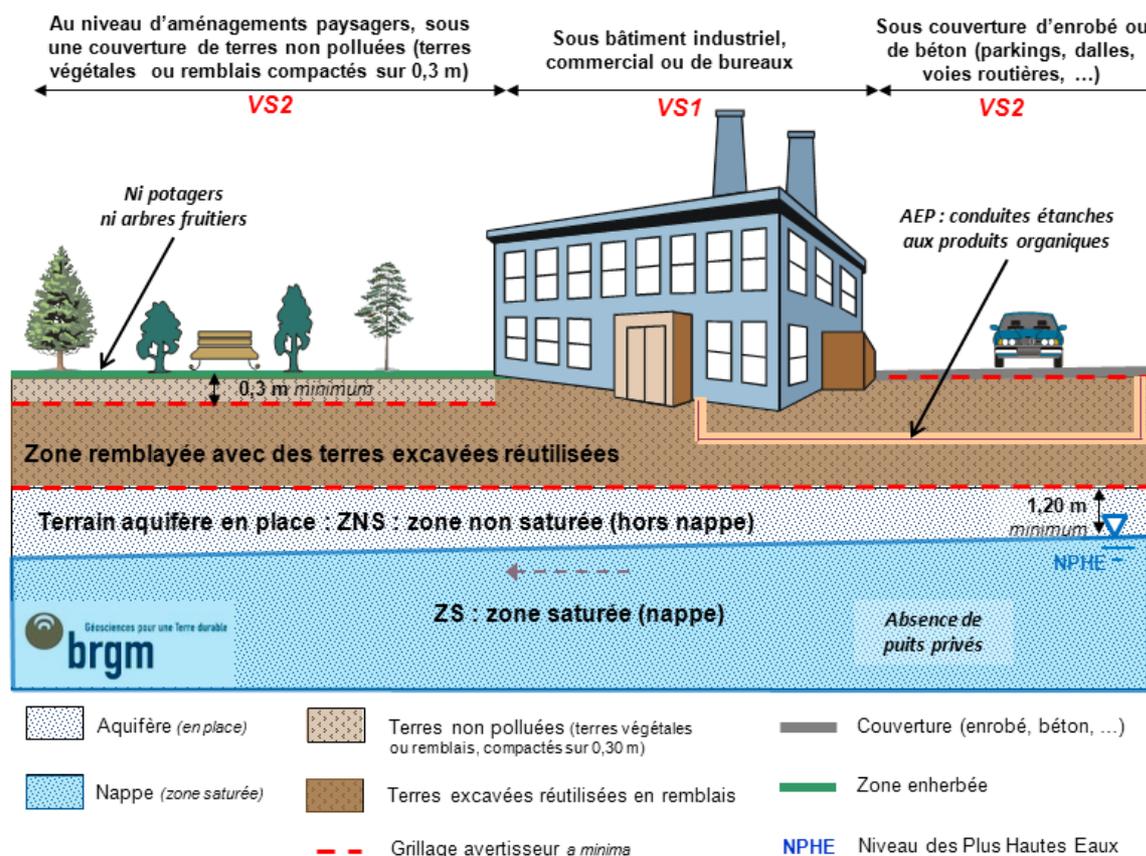
La présence de terres excavées en surface est ainsi exclue. A cet effet, un géotextile de séparation visuelle entre terres excavées réutilisées et couverture de terres saines est à prévoir. La mémoire de la pollution devra être conservée, et il conviendra de prévenir l'exposition des travailleurs et la remise en surface des terres polluées en cas de travaux dans les sols.

En outre, la présence de puits privés sur zone de réutilisation des terres excavées est exclue, sauf vérification de l'absence d'impact notable sur la qualité de l'eau (respect des critères de potabilité ou, à défaut, équivalents). L'exposition potentielle correspondante n'est pas considérée spécifiquement ici, mais s'intègre dans l'exposition de bruit de fond prise en compte dans le choix des niveaux de risque limite (§ 6.1 p 30).

Enfin, il est considéré ici que les réseaux seront protégés vis-à-vis de l'intrusion de vapeurs lors de la réalisation de projets d'aménagement : conduites d'eau potable étanches aux produits organiques (métalliques, par exemple), pose des réseaux dans des matériaux de remblai sains (matériaux classiquement utilisés pour remblayer des tranchées en site urbain).

La voie d'exposition des personnes aux substances présentes dans les terres excavées réutilisées suivant ces conditions est l'inhalation de vapeurs, émises en intérieur (à travers la dalle de fondation, pour les terres sous bâtiment) ou en extérieur (terres hors emprise de bâtiments, sous couverture).

Figure 1 : Scénarios de réutilisation des terres excavées



VS : Valeur Seuil ; TV : Terre Végétale

Pour couvrir de façon conservatoire les différentes situations, le scénario de réutilisation de terres excavées hors emprise de bâtiments a été étudié suivant deux situations d'usage :

- Zone résidentielle, avec logements collectifs et activités en extérieur, avec une couverture de terre végétale sur les terres réutilisées (ce scénario couvre le cas d'un aménagement paysager en bordure de zone résidentielle) ;
- Zone Industrielle (ZI), avec activités en intérieur et en extérieur, avec une couverture de terre végétale ou de bitume (parking) sur les terres réutilisées.

De même, deux situations d'usage ont également été étudiées pour le scénario sous bâtiment : bâtiment de bureaux, ou locaux commerciaux et industriels.

Concernant les terres réutilisées sous bâtiment, un apport de terres sous une cave ou sous un parking paraît peu réaliste. Restent comme scénarios possibles des apports sous vide sanitaire ou sous dalle. Pour obtenir des seuils les plus largement applicables possibles, le scénario le plus conservatoire de terres réutilisées juste sous la dalle et sa sous-couche de gravier, sans vide sanitaire, a été retenu.

Le schéma conceptuel de réutilisation des terres excavées et d'exposition des personnes fréquentant les lieux où ces terres sont réutilisées est synthétisé dans le Tableau 1 ci-dessous.

Voies d'exposition		Inhalation de vapeurs		Eau de puits privés	Produits du potager	Ingestion/ inhalation sol et poussières
Usage	Scénario des terres	en intérieur	en extérieur			
Bureau	Sous bâtiment (plain pied)	X	(X)	NC	Exclu	Exclu
Industriel / commercial		X	(X)	NC	Exclu	Exclu
Résidentiel (collectif ; logement et activités en extérieur)	Hors bâti, sous terre végétale	X ¹	X	NC	Exclu	Exclu
Zone Industrielle (intérieur et extérieur)	Sous couverture (parking bitume ou terre végétale)	X ¹	X	NC	Exclu	Exclu

NC : Non considéré spécifiquement : pris en compte à travers les niveaux de risque limites retenus.

(X) : voie retenue dans le schéma conceptuel mais non calculée par la suite (négligeable par rapport à la voie calculée)

¹ via l'air extérieur.

Tableau 1 : Scénarios étudiés de réutilisation des terres excavées et d'exposition des personnes

4. SELECTION DES SUBSTANCES

Le groupe de travail « terres excavées » a retenu, pour l'établissement de valeurs seuils de réutilisation, une liste de substances ou paramètres fréquemment rencontrés sur des sites pollués. Nous indiquons ci-dessous en gras les substances volatiles et semi-volatiles retenues pour l'inhalation de vapeurs depuis des sols pollués :

- pH,
- **hydrocarbures C5-C10 et C10-C40,**
- métaux et métalloïdes : As, Cd, Cr total, Cu, Ni, Pb, Zn et **Hg,**
- BTEX (Benzène, Toluène, Ethylbenzène, Xylènes),
- 16 Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (**16 HAP**),
- Composés OrganoHalogénés Volatils (COHV) : **TCE, PCE, Cis-DCE et CV,**
- **PCB,**
- cyanures libres,
- **phénol.**

Les cyanures ne sont pas volatils, mais peuvent dans certaines conditions de pH très particulières (basiques) donner lieu à un dégagement d'acide cyanhydrique HCN, très volatil et toxique. De même, la combinaison d'une pollution importante par des hydrocarbures et d'un sol riche en sulfates (gypse, bord de mer,...) peut conduire à un dégagement d'hydrogène sulfureux H₂S, également très volatil et toxique. Ces deux cas ne sont pas traduits en valeurs seuils ici, mais sont à

considérer de manière spécifique lorsque les conditions se présentent. Par exemple, en cas de présence de cyanures dans des terres, on évitera de les réutiliser, ou alors en veillant à l'absence actuelle et future (sous forme de contrainte) d'apport de produits susceptibles de permettre la libération d'HCN (par ex. assise de chaussée ou de parking traitée à la chaux).

Les hydrocarbures pétroliers C5-C10 et C10-C40 sont décomposés en coupes relativement homogènes, aliphatiques (Al) et aromatiques (Ar), définies par des gammes de nombres de carbones équivalents (EC³), suivant l'approche du Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group (TPHCWG, 1997a et 1997b).

Dans la suite de la démarche, l'élaboration des valeurs seuils ne sera pas menée au bout pour les substances suivantes, qui sont donc également à considérer de manière spécifique :

- le chlorure de méthylmercure HgMeCl, faute de Valeur Toxicologique de Référence (VTR) pour l'inhalation ;
- le mercure métallique Hg⁰, faute de relation entre la concentration dans le sol et la concentration dans l'air du sol.

Les deux colonnes correspondantes ont été maintenues dans le fichier de calcul Excel[®], avec des adaptations spécifiques des formules (signalées par des cases en bleu) pour le mercure métallique. Elles permettent l'introduction des données manquantes, ou un calcul de risque à partir de teneurs dans l'air du sol (ou inversement d'une teneur limite dans l'air du sol) pour le mercure métallique (avec ou sans prise en compte de l'épuisement de la source).

Au moment de la fixation des valeurs seuils (§ 7 p 111), le phénol sera extrapolé en indice phénol applicable aux seuls crésols et phénol.

³ Les nombres équivalents de carbones (EC) sont définis par rapport aux temps de rétention des n-alcanes dans une colonne de chromatographie en phase gazeuse : par exemple, la coupe Al >EC8-EC10 regroupe tous les aliphatiques dont les temps de rétention sont compris entre ceux du n-octane exclu et du n-décane inclus.

5. MODELISATION DES EXPOSITIONS ET DES NIVEAUX DE RISQUES

La modélisation des expositions et des niveaux de risques est détaillée dans les annexes. Ci-dessous, nous en présentons une synthèse et en discutons quelques points clés.

5.1 MODELISATION DES TRANSFERTS, DES EXPOSITIONS, DES NIVEAUX DE RISQUES

La modélisation suit le contaminant de la source jusqu'à la personne comme indiqué dans le schéma conceptuel. Elle est découpée en modules correspondant aux différents transferts entre milieux pour l'émission de vapeurs depuis le sol, puis à la traduction de l'exposition en niveaux de risque :

- équilibre triphasique dans le sol ;
- émission du sol vers l'air atmosphérique (extérieur ou intérieur) ;
- dispersion dans l'air atmosphérique ;
- exposition des personnes à l'air atmosphérique ;
- traduction de l'exposition en niveaux de risque.

La modélisation des transferts s'appuie sur le modèle hollandais CSOIL/VOLASOIL établi par le RIVM (van den Berg, 1994 ; Waitz *et al.*, 1996, Bakker *et al.*, 2008), **adapté aux spécificités des scénarios retenus**. La forme logiciel de ce modèle est par défaut d'application obligatoire en Hollande pour l'évaluation quantitative des risques sanitaires occasionnés par un site pollué. CSOIL intègre plusieurs voies d'exposition, dont le transfert de vapeurs par diffusion vers l'air intérieur et extérieur. VOLASOIL est un développement de CSOIL pour le transfert de vapeurs en intérieur. Il intègre en particulier le transport convectif (et diffusif) des vapeurs de polluants. Le modèle CSOIL de transfert de vapeurs est ainsi un cas particulier du modèle VOLASOIL, avec flux convectif nul. Il reste appliqué, dans le dispositif hollandais, au transfert de vapeurs vers l'air extérieur.

Pour l'émission de vapeurs dans l'air intérieur depuis une source sous la dalle, le modèle VOLASOIL est retenu plutôt que l'autre modèle également communément utilisé en Europe, Johnson et Ettinger (1991, US EPA, 2000, 2004) car il s'avère, dans divers cas que nous avons testés, plus conservatoire dans la situation d'une source proche de la dalle et d'un sol sous dalle fort perméable. Il nous apparaît en outre plus accessible à la compréhension, y compris vis-à-vis de ses biais. En tout état de cause, ces deux modèles sont utilisés en temps qu'état de l'art accessible aux bureaux d'étude, leur validation reste partielle et ils sont tout deux améliorables.

Le modèle d'émission de vapeurs dans l'air extérieur utilisé dans CSOIL correspond à un standard *a priori* conservatoire bien établi et universel (nonobstant des différences de présentation des équations : cf. Annexe 1, § 2.1).

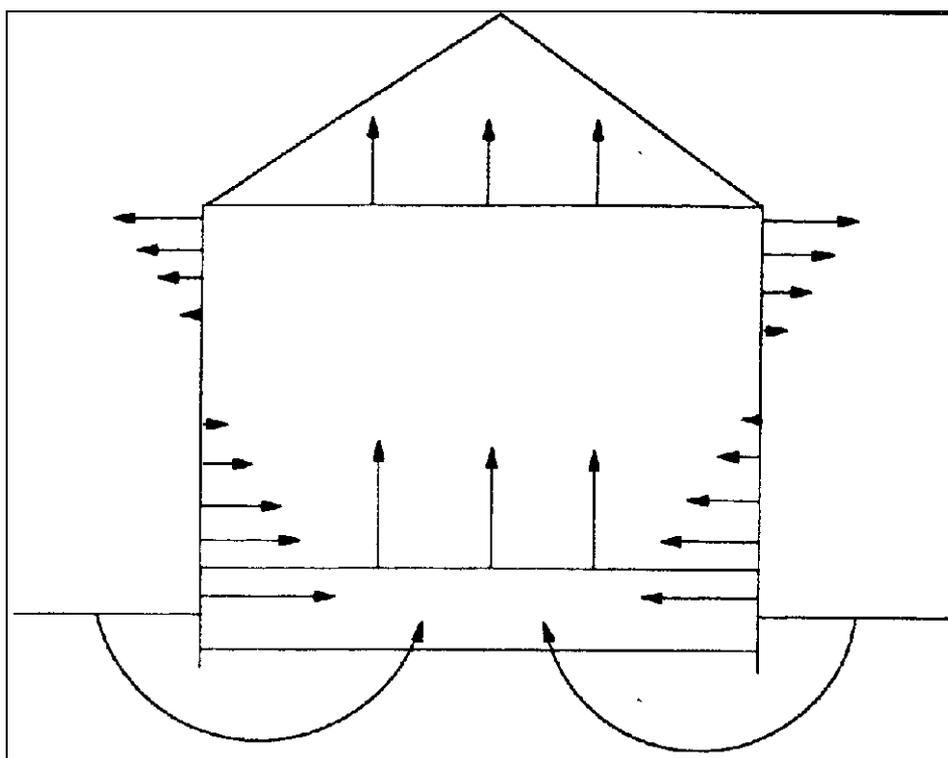
Pour tempérer certains aspects sur-conservatoires de CSOIL/VOLASOIL⁴, nous avons utilisé **une version avec source finie décroissante (épuiement de la source par le haut) de CSOIL/VOLASOIL, développée par l'INERIS** (Hulot et al., 2010). Ce sous-module "source finie décroissante" sera intégré dans l'outil de modélisation d'exposition multimédia en cours d'élaboration par l'INERIS (2010c), dans le module "transfert de vapeurs".

Le modèle VOLASOIL considère qu'une différence de pression entre l'intérieur des bâtiments et le sous-sol entraîne un flux entrant d'air contaminé depuis la source dans la zone insaturée jusque dans le bâtiment, notamment à travers la dalle de fondation.

Deux causes de dépression du bâtiment par rapport au sous-sol sont considérées (Figure 2) :

- différence de température due au chauffage ;
- dans une moindre mesure, action des vents sur les murs et mise en pression du sous-sol par l'action des vents face à l'obstacle de la maison.

Figure 2: Transport convectif d'air vers l'intérieur d'un bâtiment (Waitz et al, 1996)



⁴ Epuiement rapide (moins d'un an) de la source observé dans la modélisation en source permanente pour des substances volatiles à semi-volatiles (cf. Tableau 2). Cet épuiement rapide modélisé est lié à la configuration pénalisante du site générique pris en compte : faible épaisseur et forte perméabilité ou diffusivité des couches de couverture (dalle béton, enrobé de bitume, terre végétale).

Le modèle VOLASOIL décompose la dépression en deux parties :

- entre le bâtiment et le vide sanitaire ;
- entre le vide sanitaire et le sous-sol.

En l'absence de vide sanitaire, nous considérerons un unique flux d'air causé par la dépression totale entre le bâtiment et le sous-sol. De façon conservatoire, un éventuel rôle du gravier sous la dalle de fondation des bâtiments, comme zone de mélange, n'est pas pris en compte.

Dans la modélisation de l'équilibre multiphase, un contrôle de la saturation est appliqué, conduisant le cas échéant (teneur limite calculée au-delà de la saturation) à une absence de teneur limite calculée. Dans une optique de simplification (notamment pour éviter des valeurs seuils interdépendantes), la Loi de Raoult de saturation des hydrocarbures en mélange n'est pas appliquée ici, ce qui est légèrement conservatoire.

Différents contrôles de cohérence sont intégrés dans la fiche de calcul (cases "paramètre" grisées), calculant pour chaque substance et scénario les écarts entre différentes variantes de modélisation sur différents résultats (épaisseurs de source épuisées, facteurs de transfert, teneurs limites) :

- avec ou sans le module INERIS de décroissance de la source,
- avec ou sans convection (vers l'air intérieur)
- avec ou sans contrôle de masse global (sur la totalité de l'épaisseur de source)⁵,
- entre couverture « parking » et couverture « terre végétale »,
- vis-à-vis du modèle d'émission de vapeurs en extérieur avec une source décroissante depuis la surface utilisé par l'US EPA (1996, Appendix C) pour l'établissement des *Soil Screening Levels*.

Les écarts ainsi observés se sont avérés cohérents avec les différences de modèles et les propriétés physico-chimiques respectives des substances (diffusivité, volatilité depuis le sol). Le Tableau 2 ci-après présente l'impact de la modélisation en source finie décroissante effectuée, au regard de la modélisation en source finie pseudo-permanente (*i.e.* avec contrôle de masse global : source permanente jusqu'à son épuisement), sur l'épaisseur de source volatilisée et les teneurs limites calculées pour un choix de substances.

⁵ Ce contrôle de masse global limite le flux moyen sur une période donnée en limitant la quantité émise sur cette période à la quantité présente dans l'épaisseur de la source. Il est proposé pour VOLASOIL par Bakker *et al.* (2008, mais non intégré dans le logiciel VOLASOIL mis à disposition (Lijzen, 2011)) et pratiqué dans des outils commerciaux tels que RISC (*Risk Integrated Software for Clean-ups* - www.bprisc.com) pour l'émission de vapeurs vers l'air extérieur.

Scénario	Paramètre	Unité	CV	TCE	PCE	B	X	AI EC5-EC6	AI >EC6- EC8	AI >EC8- EC10	AI > EC10- EC12	AI >EC12- EC16	AI >EC16- EC21	Naphtalène	Acénaphthène	BaP	Phénol
	Durée t considérée (effet à seuil)	an	1	1	1	1	7	1	1	1	1	1	1	7	1	1	1
	Epaisseur de source volatilisée avant contrôle de masse global et de la saturation de l'équilibre multiphase (le contrôle de masse global limite cette épaisseur à 3 m)																
Ext. Sous TV	Source permanente	m	115	32	31	20	32	82	50	16	3,0	0,5	0,03	0,25	0,014	1,8E-6	0,011
	Source décroissante	m	7	4	3	3	4	6	4	2,4	0,9	0,3	0,03	0,18	0,013	1,8E-6	0,011
Sous bâti	Source permanente, convection & diffusion	m	2420	892	974	543	1047	3890	2912	1184	282	64	5	19	1,2	2,2E-5	0,06
	Source permanente, convection seule	m	2420	892	974	543	1047	3890	2912	1184	282	64	5	19	1,2	2,2E-5	0,06
	Source permanente, diffusion seule	m	30	8	8	5	8	21	13	4	0,8	0,14	0,008	0,06	0,003	3,9E-8	5,6E-4
	Source décroissante, convection seule	m	14	8	9	7	9	18	15	10	5	2,2	0,6	1,2	0,3	2,2E-5	0,04
	Source décroissante, diffusion seule	m	6	3	3	2	3	5	4	1,9	0,6	0,13	0,008	0,06	0,003	3,9E-8	5,6E-4
	Source décroissante, convection & diffusion	m	20	11	12	9	12	23	19	12	5	2,4	0,6	1,3	0,3	2,2E-5	0,04
	Teneurs limites calculées dans le sol après contrôle de masse global et de la saturation de l'équilibre m																
ZAC	Source permanente	mg/kg ms	1,6E+0	4,9E+0	9,8E-1	2,7E-1	2,0E+1	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	6,4E-1	PVL	PVL	1,5E+2
	Source décroissante	mg/kg ms	1,6E+0	4,9E+0	9,8E-1	2,9E-1	2,0E+1	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	1,7E+0	PVL	PVL	1,6E+2
Bureau	Source permanente	mg/kg ms	2,9E-1	9,0E-1	1,8E-1	5,0E-2	3,6E+0	9,5E+1	PVL	5,2E+0	5,2E+0	PVL	PVL	5,3E-2	1,6E+0	PVL	5,3E+0
	Source décroissante	mg/kg ms	2,9E-1	9,0E-1	1,8E-1	5,0E-2	3,6E+0	9,5E+1	PVL	5,2E+0	5,2E+0	PVL	PVL	5,5E-2	2,5E+0	PVL	7,7E+0
ZAC	Rapport : Avec / Sans source	-	1,0	1,0	1,0	1,1	1,0	=	=	=	=	=	=	2,7	=	=	1,0
Bureau	décroissante	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	=	1,0	1,0	=	=	1,0	1,5	=	1,5

*= Facteur de transfert retenu, moyennant le contrôle de masse global qui écriète à 3 m

Tableau 2 : Sensibilité des teneurs limites calculées vis-à-vis des variantes de VOLASOIL/CSOIL utilisées

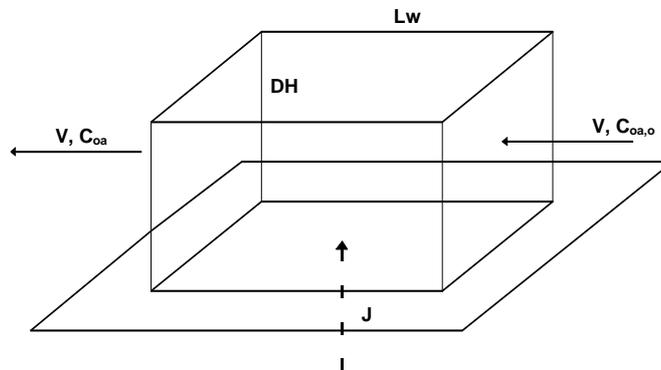
Il ressort du Tableau 2 que :

- l'impact du choix de la modélisation en source descendante sur les teneurs limites calculées est ici généralement nul, et limité à un facteur 1,5 sous bâtiment (1,5 pour le phénol) et 2,7 sous couverture en extérieur (2,7 pour le naphtalène) ;
- ce faible impact résulte de l'écrêtage des transferts :
 - par l'épaisseur finie de la source, pour les substances volatiles à semi-volatiles (la source est rapidement épuisée : "épaisseur volatilisée" supérieure à 3 m dans le Tableau 2) ;
 - ou par la saturation de l'équilibre triphasique (pour les substances moins volatiles : on aboutit à une absence de valeurs limites calculées, "PVL").

La dispersion dans l'air atmosphérique des vapeurs émises depuis le sol se fait par mélange :

- en intérieur, avec un flux de ventilation donné des pièces, décrit par le taux de ventilation et la hauteur de la pièce ;
- en extérieur, avec un flux d'air amont porté par le vent à une vitesse donnée et à une hauteur donnée (hauteur de respiration de la personne considérée, adulte ou enfant ; modèle de la boîte, Figure 3 ci-dessous).

Figure 3 : Modèle de la boîte pour la dispersion dans l'air extérieur



Les mécanismes de transfert précédents aboutissent à des concentrations moyennes dans l'atmosphère respirée par l'homme (enfant et/ou adulte) en un endroit donné sur des périodes données⁶. Chaque concentration se traduit en :

- niveau d'exposition (concentration moyenne inhalée) sur une période de vie donnée en la pondérant par le taux de fréquentation du lieu (supposé constant sur la période d'exposition considérée) ;
- niveau de risque en confrontant ce niveau d'exposition à la Valeur Toxicologique de Référence (VTR), sous la forme suivante :
 - Quotient de Danger (QD⁷) pour les effets à seuil, par division de la concentration moyenne inhalée (sur un à sept ans suivant la source de la VTR) par la Concentration Tolérable (CT ou RfC, *Reference Concentration*). Entre le quotient de danger d'un enfant et d'un adulte, on retient le plus élevé comme indicateur du risque ;
 - Excès de Risque Individuel (ERI) (de développer un cancer du fait de l'exposition à la pollution) pour les effets sans seuil, par multiplication de la concentration moyenne inhalée (sur une vie entière, avec cumul des périodes enfant et adulte) avec l'Excès de Risque Unitaire (ERU)⁸.

Pour l'élaboration de seuils génériques indépendants entre eux telle que pratiquée ici, le cumul des effets entre substances n'est pas traité par addition de ces indicateurs sur différentes substances, mais dans le choix des niveaux de risque ciblés (§ 6.1).

Des approximations marquantes du modèle ainsi utilisé sont décrites avec leurs impacts respectifs dans le Tableau 3 ci-après.

⁶ Périodes d'application des VTR (cf. § 5.4) sur les durées d'exposition des personnes.

⁷ Lorsque le quotient de danger (multi-substances et multi-expositions) est inférieur à 1, la survenue d'un effet toxique est considérée comme exclue, même pour les populations sensibles, au regard des connaissances scientifiques disponibles. Au-delà de 1, la possibilité d'apparition d'un effet toxique ne peut plus être exclue. Cette possibilité apparaît d'une manière générale d'autant plus forte que le QD augmente. Mais ce degré de vraisemblance n'est pas linéaire par rapport au QD. En effet, les concentrations tolérables des effets à seuil ne sont pas toutes définies avec le même degré de précision et sont basées sur des effets toxiques plus ou moins significatifs.

⁸ Pour les effets cancérigènes sans seuil, l'excès de risque unitaire par la voie inhalation est la probabilité supplémentaire, par rapport à un sujet non exposé, qu'un individu a de développer l'effet s'il est exposé par la voie inhalation à une unité de dose ou de concentration de la substance considérée pendant sa vie entière. L'excès de risque unitaire par voie inhalation s'exprime comme l'inverse d'une concentration en substance dans l'air (mg/m^3)⁻¹.

Approximation	Impact sur les seuils proposés
Comme dans VOLASOIL, la dégradation ou le lessivage de la pollution au niveau de la source au cours du temps ou lors du transfert n'est pas prise en compte dans la modélisation.	Tendance conservatoire, mais non prise en compte de la formation éventuelle de métabolites plus toxiques ⁹ .
Dans une optique de simplification (notamment pour éviter des seuils interdépendants), la Loi de Raoult de saturation de plusieurs hydrocarbures en mélange n'est pas appliquée ici.	Légèrement conservatoire (écrêtage plus haut des teneurs limites).
Dans le modèle VOLASOIL, la différence de pression induit un flux d'air continu depuis la zone source du sol vers l'air intérieur. Pour des couches en profondeur, la réalimentation, et donc la possibilité, d'un tel flux d'air montant depuis des couches profondes posent question.	Conservatoire. Potentiellement important pour les substances plus volatiles ¹⁰ , mais tempéré ici par la limitation de l'épaisseur de la source (3 m).
Les variations temporelles (au sein d'une journée et d'un jour à l'autre) de la pression atmosphérique, et donc de la différence de pression entre l'air du sol et l'air intérieur (mais aussi extérieur), ne sont pas retracées dans la modélisation. Elles occasionnent des périodes de flux plus faibles (voire inverses) et plus importants. La documentation des modèles VOLASOIL et Johnson et Ettinger ne précise pas si la valeur retenue couvre ces variations (une valeur moyenne ne serait pas forcément conservatoire).	Incertain.
Dans la modélisation avec source finie décroissante appliquée ici, le toit de la source descend à mesure que la source s'épuise par le haut. Un épuisement total de la couche supérieure de la source est pris en compte pour déterminer le rythme de descente du toit, alors qu'un épuisement partiel serait plus réaliste ¹¹ . Le rythme de descente du toit en ressort légèrement sous-estimé, et les flux de vapeurs légèrement sur-estimés.	Conservatoire. Faible au regard des autres incertitudes.
Le modèle de la boîte a l'avantage de la simplicité et de la transparence. Le flux émis sur la surface d'émission est supposé se répartir immédiatement dans la "boîte". Ce modèle ne prend pas en compte la dispersion verticale au-delà de la boîte (contrairement par exemple au modèle SOILRISK utilisé dans CSOIL (van den Berg, 1994). La pollution émise s'accumule ainsi dans la boîte sur toute la longueur du site dans le sens du vent.	Conservatoire. D'autant plus important que la surface est étendue.

Tableau 3 : Approximations marquantes du modèle utilisé

⁹ Pour les solvants chlorés, le risque de formation en chlorure de vinyle est souvent avancé. Toutefois, le chlorure de vinyle est fortement suspecté de se dégrader rapidement dans la zone non saturée (retour d'expérience INERIS, approfondissements en cours).

¹⁰ Pour certaines substances volatiles comme le chlorure de vinyle ou le benzène, le modèle - sans et même parfois avec épuisement de la source- fait apparaître un épuisement potentiel de source sur plus de 10 mètres de profondeur en 1 an.

¹¹ Dans le modèle considéré, le sol au dessus du toit de la source n'est pas exempt de pollution : il présente un continuum de teneurs décroissantes de la source à la surface.

5.2 CARACTERISTIQUES DES VOIES DE TRANSFERT

5.2.1 CARACTERISTIQUES DES SOLS ET MATERIAUX

Les caractéristiques des sols et matériaux ont été retenues en concertation avec le GT « terres excavés ». Elles sont présentées dans le Tableau 4 ci-dessous.

Couche	Matériau	Paramètre Unité						méabilité de poro		li m
			foc %kgOC/kgms	n lvide/lisol	SD kgms/l	Vw lpw/lisol	Va lsa/lisol	k m/s	K m3 /m	
Couche limite	Air		NC	1	NC	0	1			0,005
Dalle	Béton sec qualité normale		NC	0,02	NC	0	0,02	NC	NC	0,15
Sous dalle	Gravier (sec)		NC	0,2	NC	0	0,2	0,01	1,3E-09	0,15
Enrobé parking	Bitume parking		NC	0,03	NC	0	0,03	NC	NC	0,04
Sous enrobé	Gravier (sec)		NC	0,2	NC	0	0,2	NC	NC	0,4
TV pelouse	Limon sableux pelouse		NC	0,4	NC	0,18	0,22	NC	NC	0,3
Terres excavées	Sable limoneux		0,1	0,4	1,5	0,2	0,2	4E-05	5,3E-12	3

NC: non concerné Grisé: donnée d'entrée Fond blanc: calculé

Paramètre	Symbole	Unité
Teneur en carbone organique (OC) dans le sol	foc	%kgOC/kgms
Porosité	n	lvide/lisol
Densité du sol sec en place	SD	kgms/l
Fraction volumique d'eau dans le sol	Vw	lpw/lisol
Fraction volumique d'air dans le sol	Va	lsa/lisol
Conductivité hydraulique du sol	k	m/s
Perméabilité intrinsèque du sol	K	m3 /m
avec : Epaisseur de la couche i (au dessus de la source)	li	m

Tableau 4 : Caractéristiques retenues pour les sols

Pour assurer une large applicabilité des valeurs seuils proposées, la logique a été de retenir des caractéristiques réalistes conservatoires :

La stratigraphie au dessus de la zone source est définie comme suit :

- Stratigraphie sous bâtiment au dessus des terres excavées :
 - 15 cm de gravier,
 - 15 cm de dalle « qualité normale » au sens de VOLASOIL ;
- Stratigraphie hors emprise des bâtiments au dessus des terres excavées :
 - 30 cm de terre végétale de pelouse standard (limon sableux), ou
 - 4 cm d'enrobé bitumineux sur 40 cm de gravier sec ;
- Fraction de carbone organique (foc) du sol source (terres excavées) relativement faible, favorisant la libération sous forme dissoute ou vapeur, et correspondant à un sol relativement profond (sous la terre végétale).
- Terres sous bâtiments (terres excavées) relativement perméables (à l'eau comme aux vapeurs) dans la limite de terres couramment réutilisées pour un tel usage (caractéristiques géotechniques et occurrence) : le choix s'est porté sur un sol sablo-limoneux de perméabilité à l'eau de 4.10^{-5} m/s ;

Les autres caractéristiques des sols ont été fixées sur la base des valeurs proposées dans les documentations des modèles HESP (Shell, 1995), Johnson et Ettinger, VOLASOIL et d'autres ouvrages de référence en la matière (de Marsily,

1981), ainsi que, pour la couverture d'enrobé bitumineux, d'une description par l'USIRF (2011) des gammes de caractéristiques de ce matériau (cf. Annexe 2).

La sensibilité des teneurs limites calculées au choix de la foc et de la perméabilité des terres excavées se présente comme suit :

- Dans les modèles en source décroissante, le coefficient de transfert du sol vers l'air du sol et la perméabilité du sol n'interviennent pas linéairement dans l'expression du risque, contrairement aux modélisations en régime permanent, mais sub-linéairement. En effet, une augmentation du transfert de pollution sous forme de vapeurs qui serait générée par des variations de ces paramètres, serait en partie compensée par une descente plus rapide du toit de la source, qui intervient de façon limitante sur le transfert.
- En outre, dans la modélisation en source finie (restreinte à une épaisseur de sol donnée), le contrôle de masse global écrête la quantité totale de polluant transférée sur la période d'exposition à prendre en compte, et donc le flux moyen sur cette période. A partir d'un certain niveau de flux, cet écrêtage supprime la sensibilité des teneurs limites calculées vis-à-vis des paramètres de transfert.
- Inversement, l'écrêtage des teneurs limites calculées par le contrôle de la saturation de l'équilibre multiphase supprime cette sensibilité en deçà d'un certain niveau de flux (« pas de valeur limite »).
- Enfin, dans la modélisation de l'équilibre multiphase, la fraction de carbone organique du sol source (foc) intervient quasi-linéairement sur le coefficient de transfert du sol vers l'air du sol uniquement pour les polluants se trouvant principalement sous forme adsorbée. La relation devient fortement sub-linéaire pour des substances comme le chlorure de vinyle, le phénol, la coupe Al EC5-EC6, voire le TCE, le PCE, le benzène, le toluène, qui présentent une affinité limitée envers la matrice solide du sol¹².
- Une **étude de sensibilité** a été réalisée sur ces deux paramètres, vis-à-vis de deux valeurs moins pénalisantes (mais encore relativement prudentes) de la foc et de la perméabilité du sol. Elle est présentée sur un choix de substances dans le Tableau 6 p 27, avec indication de l'épaisseur de source épuisée dans chaque simulation. Il en ressort que la sensibilité des teneurs limites calculées dans les sols vis-à-vis de ces paramètres dans les gammes et la configuration du site considérées (notamment épaisseur de source de 3 m), est :
 - quasi-nulle pour les substances volatiles (jusqu'aux xylènes et Al EC10) sous bâtiment, et très volatiles (jusqu'au DCE¹³) en extérieur : la source est totalement épuisée dans les 3 configurations sur la durée considérée ;
 - quasi-nulle pour les substances lourdes (hydrocarbures au-delà de EC16 dont BaP,...) sous bâtiment et les substances peu volatiles (Ar > EC12 et Al > EC10) ou peu toxiques (Al EC5-EC8) en extérieur : le contrôle de la saturation au niveau du sol source écrête les teneurs limites ;

¹² Coefficient de partage carbone organique eau, Koc, de 7,9 l/kg, 12 l/kg, 794 l/kg, 60 à 200 l/kg respectivement, et coefficient de Henry de 1,1 et de 36 pour le chlorure de vinyle et Al EC5-EC6 respectivement. Dans la configuration de sol source retenue pour la modélisation, le transfert de l'air du sol est multiplié seulement par 1,1, 1,4, 2,5 à 3,8 lorsqu'on divise la foc par 6.

¹³ Voire TCE pour une période d'exposition plus longue (effet sans seuil déterminant).

- sub-linéaire dans les cas intermédiaires, avec :
 - un impact maximum d'un facteur 2 pour la perméabilité divisée par 4,
 - un facteur 3 pour la foc multipliée par 6 (naphtalène dans les deux cas),
 - le passage en « valeur limite » plutôt que « pas de valeur limite » (PVL) dans quelques cas.

Des approximations ou incertitudes marquantes de la paramétrisation utilisée pour les sols sont décrites avec leurs impacts respectifs dans le Tableau 5 ci-dessous.

Approximation	Impact sur les seuils proposés
<p>Pour le transport convectif, la perméabilité à l'air du sol est fixée à partir de sa perméabilité à l'eau, par application du rapport des viscosités entre l'air et l'eau. Cela revient à considérer un sol saturé en air. Cette approximation est majorante : en réalité, l'eau interstitielle, en occupant une partie des pores du sol, réduit la perméabilité à l'air.</p>	<p>Conservatoire. Potentiellement important en général, mais limité ici (cf. discussion de la perméabilité ci-dessous).</p>
<p>Toute la porosité du sol occupée par l'air est considérée comme participant à la diffusion des vapeurs, y compris l'éventuelle porosité occluse, qui n'y participe pas.</p>	<p>Conservatoire. Plutôt faible ici (sols granulaires)</p>
<p>Pour la couche de surface, on a retenu un sol sablo-limoneux « standard » légèrement desséché. Un sol plus sec serait sans doute réaliste. Le taux d'humidité du sol de couverture influe sur le risque et les concentrations limites calculées pour les substances semi-volatiles et surtout polaires. La relation au risque estimé est croissante pour le phénol et les hydrocarbures agrégés C10-C40 (seuil diminué de près de 25% pour une hausse de 10% de Vw), et décroissante pour le naphtalène (seuil augmenté de 10%). Le degré d'humidité du sol retenu est un compromis, il serait envisageable de retenir une valeur seuil correspondant à la plus pénalisante entre deux situations de sols plus ou moins humides.</p>	<p>Conservatoire ou non selon les substances.</p>
<p>La modélisation de la perméabilité de la dalle dans VOLASOIL, conceptuellement conservatoire, repose sur une paramétrisation peu documentée (fraction surfacique des fissures dans la dalle, rayon de tubes équivalents considérés).</p>	<p>Incertain. Potentiellement important. Mais faible à nul pour les substances volatiles et très peu volatiles¹⁴.</p>

Tableau 5 : Approximations ou incertitudes marquantes de la paramétrisation des sols

¹⁴ Epuisement de la source pour les substances très volatiles (jusqu'au xylène inclus), « pas de valeur limite » pour les substances très peu volatiles, avec un béton de « bonne qualité » selon VOLASOIL (perméabilité à l'air divisée par 100). Augmentation maximale de la concentration limite calculée d'un facteur 5 pour les Ar EC8-EC10.

	Paramètre	Unité	CV	TCE	PCE	B	X	Al EC5-EC6	Al >EC6- EC8	Al >EC8- EC10	Al >EC10- EC12	Al >EC12- EC16	Al >EC16- EC21	Naphtalène	Acénaphthène	BaP	Phénol	
	Durée t considérée (effet à seuil)	an	1	1	1	1	7	1	1	1	1	1	1	7	1	1	1	
	Rapport des CT du sol à l'eau interstitielle, foc=0,1 / foc = 0,6	-	1,1	2,9	3,6	2,4	5,0	1,7	2,8	4,7	5,7	5,9	6,0	5,3	5,7	6,0	1,4	
Sous bâtiment BUREAUX																		
k foc	4E-5	Teneur limite (effet à seuil) *	mg/kg ms	2,9E-1	1,0E+0	1,8E-1	5,0E-2	3,6E+0	9,5E+1	9,5E+1	5,2E+0	5,2E+0	6,5E+0	PVL	2,6E-1	PVL	PVL	7,7E+0
	0,1	Teneur limite (effet sans seuil) *	mg/kg ms	1,8E+0	9,0E-1	3,1E-1	3,0E-1	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	5,5E-2	2,5E+0	5,6E+0	PVL
		Épaisseur de source volatilisée à t, avant contrôle de masse global	m	20	11	12	9	12	23	19	12	5,3	2,4	0,6	1,3	0,28	2,2E-5	0,04
		Teneur limite	mg/kg ms	2,9E-1	9,0E-1	1,8E-1	5,0E-2	3,6E+0	9,5E+1	PVL	5,2E+0	5,2E+0	PVL	PVL	5,5E-2	2,5E+0	PVL	7,7E+0
k foc	1E-5	Épaisseur de source volatilisée à t, avant contrôle de masse global	m	13	7	7,4	5,5	8	14	12	6,8	3,0	1,3	0,3	0,7	0,15	2,2E-5	0,03
	0,1	Teneur limite	mg/kg ms	2,9E-1	9,0E-1	1,8E-1	5,0E-2	3,6E+0	9,5E+1	PVL	5,2E+0	5,2E+0	PVL	PVL	1,1E-1	5,0E+0	PVL	1,2E+1
k foc	4E-5	Épaisseur de source volatilisée à t, avant contrôle de masse global	m	19	6,5	6,0	5,5	5,1	17	11	5,1	2,1	0,9	0,2	0,5	0,10	3,7E-6	0,03
	0,6	Teneur limite	mg/kg ms	2,9E-1	9,0E-1	1,8E-1	5,0E-2	3,6E+0	9,5E+1	9,5E+1	5,2E+0	7,4E+0	1,7E+1	PVL	1,3E-1	6,2E+0	PVL	1,0E+1
Zone récréative + habitations (ZAC), terres en ext. sous couverture terre végétale (30 cm)																		
foc	0,1	Teneur limite (effet à seuil) *	mg/kg ms	1,6E+0	5,6E+0	9,8E-1	2,9E-1	2,0E+1	5,2E+2	5,2E+2	3,5E+1	8,9E+1	2,7E+2	PVL	9,8E+0	PVL	PVL	1,6E+2
		Teneur limite (effet sans seuil) *	mg/kg ms	9,8E+0	4,9E+0	1,7E+0	1,6E+0	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	1,7E+0	1,0E+2	4,0E+2	PVL
		Épaisseur de source volatilisée à t, avant contrôle de masse global	m	6,9	3,5	3,5	2,7	3,5	5,8	4,4	2,4	0,9	0,3	0,03	0,2	0,0	1,8E-6	0,01
		Teneur limite	mg/kg ms	1,6E+0	4,9E+0	9,8E-1	2,9E-1	2,0E+1	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	1,7E+0	PVL	PVL	1,6E+2
foc	0,6	Épaisseur de source volatilisée à t, avant contrôle de masse global	m	6,4	2,0	1,8	1,7	1,5	4,3	2,5	1,0	0,3	0,1	0,01	0,04	0,0	3,0E-7	0,01
		Teneur limite	mg/kg ms	1,6E+0	4,9E+0	1,7E+0	4,7E-1	4,0E+1	PVL	PVL	8,4E+1	PVL	PVL	PVL	5,4E+0	PVL	PVL	2,2E+2
PVL: Pas de Valeur Limite			* Teneur limite (effet à seuil /sans seuil): avant contrôle de la saturation															

Tableau 6 : Sensibilité des concentrations limites calculées vis-à-vis de la foc et de la perméabilité du sol source

5.2.2 CONDITIONS DE VENTILATION ET DE PRESSIONS, ET DE FREQUENTATION DES LIEUX

Nous reprenons la différence de pression ΔP de VOLASOIL cumulée entre l'air du sol et l'intérieur du bâtiment (4 Pa), également retenue par l'US EPA (2004) comme valeur conservatoire par défaut. Dans VOLASOIL, cette différence de pression est donnée indépendamment de la profondeur de l'air du sol. Dans la réalité un gradient de pression s'établit dans l'air du sol.

Ainsi, dans la modélisation avec source finie décroissante effectuée ici, la source s'épuise par le haut, le toit de la source se trouve donc à une profondeur croissante dans le sol (de 0 à 3 m), mais le ΔP reste constant.

Cette approche est conservatoire, en particulier pour les substances moins volatiles (source proche de la dalle, où le ΔP est le plus surestimé).

Les conditions de ventilation et de fréquentation des lieux sont résumées dans le Tableau 7 et le Tableau 8 ci-après. L'enfant est assimilé à un individu d'âge inférieur à 6 ans. On considère :

- Pour la disposition des lieux hors bâti : des zones de 150 m x 150 m comme convenu avec le GTT « terres excavées ».
- Pour les fréquentations des lieux :
 - ZAC : Zone récréative et logements : exposition en extérieur et en intérieur (rez-de-chaussée), enfant et adulte ;
 - ZI : mi-temps en extérieur et en intérieur (rez-de-chaussée), employé.

Zone d'exposition	Zone d'émission	Personnes	Rythmes d'exposition					Ventilation	
			DE	fréquences FEM (h/j)			FEMcanc sur 70 ans	Hvd	Rv
				hiver	été	année			
années	h/j	h/j	h/j	h/j	m	h-1			
ZAC en extérieur (zones récréatives)	Extérieur	enfant	6	1h - 7j/7	8h - 7j/7	4,50	0,39		
		adulte	64	1h - 7j/7	3h - 5j/7 12h - 2j/7	3,29	3,0		
		enfant	6	23h - 7j/7	16h - 7j/7	19,50	1,7		
		adulte	64	14h - 5j/7 23h - 2j/7	12h - 7j/7	14,29	13,1		
ZAC en intérieur (RdC, complément)	Extérieur	adulte	40	4h/j - 220 j/an		2,41	1,38		
		enfant	6	0		0	0		
ZI en extérieur (employé 50% dehors)	Extérieur	adulte	40	4h/j - 220 j/an		2,41	1,38		
		enfant	6	0		0,0	0,0		
ZI en intérieur (RdC, complément)	Intérieur	employé adulte	40	8h/j - 220 j/an		4,82	2,76	2,5 1,07	
		usager enfant	6	0		0	0		
BUREAUX (en intérieur)	Intérieur	employé adulte	40	8h/j - 220 j/an		4,82	2,76	3,5 2,13	
		usager enfant	6	0		0	0		

Fréquence d'exposition moyenne (annuelle) à l'air considéré

FEM h/j

Durée d'exposition

DE ans

Grisé: donnée d'entrée

Fréquence d'exposition moyenne sur 70 ans à l'air considéré

FEMcanc h/j

Fond blanc: calculé

Hauteur en intérieur

Hvd m

Taux d'échange d'air intérieur

Rv h-1

Tableau 7 : Conditions de ventilation des bâtiments et de fréquentation des différents lieux

Paramètre	Symbole	Unité	Valeur
Longueur de la zone d'émission dans le sens du vent	Lw	m	150
Hauteur de mélange, adulte en extérieur	DHa	m	1,5
Hauteur de mélange, enfant en extérieur	DHc	m	1
Hauteur de mélange, rez de chaussée ¹⁵	DHc	m	2,5
Vitesse du vent	V	m/s	3

Tableau 8 : Conditions de dispersion des vapeurs en extérieur

5.3 DONNEES PHYSICO-CHIMIQUES DES SUBSTANCES

Les données physico-chimiques utilisées dans la modélisation sont présentées et discutées en Annexe 3. Ces données ont été recherchées dans :

- les fiches de données toxicologiques et environnementales des substances dangereuses de l'INERIS ;
- les fiches de HSDB (*Hazardous Substances Data Bank*) ;
- la documentation de CSOIL (van den Berg, 1994) ;
- les fiches de données de Verschueren (1997) ;
- le rapport du TPHCWG (1997b).

Des formules ont été utilisées pour estimer des valeurs de certains paramètres en l'absence de données de mesure dans la documentation consultée.

Les principales incertitudes sur les données physico-chimiques des substances portent sur le coefficient de partage carbone organique / eau, Koc. Toutefois, de même que pour la foc, l'impact de cette incertitude sur les teneurs limites calculées reste nulle ou limitée dans le cadre de la configuration de site retenue.

5.4 CHOIX DES VALEURS TOXICOLOGIQUES DE REFERENCE

Le choix des Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR) est détaillé en Annexe 3. La démarche de choix a été d'assurer la cohérence avec le choix des VTR effectué pour l'interprétation des diagnostics de bâtiments accueillant du public établis sur d'anciens sites industriels, soit, par ordre de priorité :

1. Valeurs retenues pour les « diagnostics dans les établissements accueillant du public » (BRGM, 2010), sauf actualisation de VTR par l'organisme émetteur entre-temps (pour le Cis-DCE : valeur provisoire du RIVM de 2001 changée en valeur définitive en 2009).
2. Choix du ministère du Développement Durable (chlorure de vinyle) ou de l'AFSSET/ANSES.
3. VTR la plus pénalisante parmi les 6 sources principales de VTR (ATSDR, OMS, US EPA, OEHHA, Santé Canada, RIVM), en écartant toutefois d'éventuelles valeurs considérées comme manifestation excessives (expertise INERIS).

Les derniers calculs de valeurs seuils ont été réalisés en mai 2011; les

¹⁵ Pour l'air extérieur s'infiltrant en intérieur, où il est respiré.

modifications ultérieures dans les sources ci-dessus ne sont donc pas intégrées (notamment la mise à jour de début 2012 des choix pour les « établissements accueillant du public »).

Les VTR intègrent des choix de gestion (effectués de fait par les toxicologues), notamment au niveau de la sélection des effets à considérer comme pertinents. Elles sont en partie de nature conventionnelle. Elles peuvent varier d'un voire plusieurs ordres de grandeur entre organismes. Le choix d'écarter les valeurs considérées comme manifestement excessives (expertise INERIS) réduit à notre sens la gamme des incertitudes à un ordre de grandeur environ.

6. CHOIX DE NIVEAUX DE RISQUE LIMITES ET CALCUL DE TENEURS LIMITES

6.1 CHOIX DE NIVEAUX DE RISQUE LIMITES

Les niveaux de risque limites ont été fixés suivant la même logique que dans la démarche d'Interprétation de l'Etat des Milieux (IEM), de sorte à se prémunir, à travers les valeurs seuils génériques, vis-à-vis du cumul des effets des substances ou des autres expositions environnementales (pollution de l'air intérieur, alimentation,...) :

- Quotient de Danger QD fixé à 0,2
- Excès de risque Individuel ERI fixé à 10^{-6}

Une démarche de garantie de la qualité des milieux en termes d'odeur a été testée dans le cadre de l'élaboration des valeurs seuils, mais n'a pas été poursuivie, en concertation avec le groupe de travail « terres excavées », du fait des importantes incertitudes quant aux niveaux de détection olfactive et de l'impact disproportionné qui en résultait sur les teneurs limites calculées¹⁶.

6.2 CALCUL DE TENEURS LIMITES AU REGARD DU RISQUE SANITAIRE

Les concentrations limites dans les terres excavées au regard du risque sanitaire sont obtenues par calcul inverse à partir des niveaux de risque retenus et du facteur de proportionnalité entre la teneur dans le sol et ce niveau de risque.

Ces concentrations limites sont calculées d'abord pour des effets à seuil et sans seuil séparément. Puis, la plus basse des deux concentrations limites est retenue.

Ces teneurs limites sont reportées dans le Tableau 10 p 32, sous forme de concentrations totales dans le sol et de concentrations dans l'air du sol.

Pour le premier scénario d'usage (terres sous bâtiment de bureau), nous affichons à titre d'information les teneurs limites calculées respectivement sur la base des

¹⁶ Cette approche n'est pas détaillée ici. Les éléments de calcul sont maintenus dans la feuille de calcul Excel, mais ne sont pas pris en compte dans les calculs des seuils.

effets à seuil et sans seuil respectivement, avant agrégation. L'impact du contrôle de la saturation (cf. § 5.1) est illustré pour chaque scénario à travers l'affichage des concentrations limites avant et après ce contrôle.

Ce tableau intègre un premier regroupement de scénarios pour la zone Industrielle, entre les couvertures de terre végétale et de bitume : la teneur limite la plus basse est retenue. Les écarts sur les teneurs limites entre les deux scénarios de couverture sont relativement limités (souvent nuls, facteur 5 au maximum : cf. Tableau 9 ci-dessous),

Substances	Diffusivité totale de la couverture	Transfert sur les périodes considérées	Teneurs limites
Volatiles	Equivalente (x 0,94)	Sans impact car épuisement total de la source dans les deux cas	Sans impact
Semi volatiles	Equivalente (x ~ 0,9)	Equivalente	Sans impact (équivalent ou PVL)
Non volatiles / très solubles	Plus faible (2,6.10 ⁶ fois pour Indeno[1,2,3-cd]pyrène, 5 fois pour phénol)	Plus de 2,2 fois plus faibles	Phénol : x 5 Autres : sans impact : PVL dans les deux cas

Tableau 9 : Ecart de diffusivités, transferts et teneurs limites, pour une couverture de parking bitume vis-à-vis d'une couverture de terre végétale

Ces teneurs limites calculées dans les sols appellent les commentaires suivants :

- Pour beaucoup de substances semi-volatiles, le contrôle de la saturation de l'équilibre multiphase induit une absence de teneurs limites. C'est le cas de coupes hydrocarbures (notamment aliphatiques au-delà de C12), et des HAP à partir du phénanthrène.
- Pour les substances volatiles (COHV, BTEX) voire semi-volatiles pour les scénarios sous bâtiment, le facteur limitant est l'épaisseur de terres excavées appliquée, à travers le contrôle de masse global. La volatilité elle-même n'est alors plus aucunement déterminante dans le transfert, tant qu'elle reste supérieure au niveau qui assure l'épuisement de la source. La seule caractéristique des polluants qui détermine alors la teneur limite calculée est la toxicité (selon une relation linéaire). Ainsi, parmi les hydrocarbures sur le scénario bureau avant contrôle de la saturation, les aliphatiques EC5-EC6 et >EC6-EC8 présentent des teneurs limites calculées :
 - égales entre elles bien que de volatilité différente, parce qu'elles ont la même VTR et que la zone source est épuisée (cf. Tableau 2) ;
 - 18,4 fois plus élevés que les aliphatiques >EC8-EC10 et >EC10-EC12, moins volatils mais présentant une VTR 18,4 fois plus basse, et pour lesquelles la zone source est épuisée ;
 - moins de 18,4 fois plus élevés que les aliphatiques >EC12-EC16, moins volatils mais présentant une VTR 18,4 fois plus basse, et pour lesquelles la zone source n'est pas épuisée (cf. Tableau 2).

Unité	CV	cis-DCE	TCE	PCE	B	T	E	X	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar	AI	AI	AI	AI >	AI	AI	AI	
									>EC8- EC10	>EC10- EC12	>EC12 - EC16	>EC16 - EC21	>EC21 - EC35	EC5-EC6	>EC6- EC8	>EC8- EC10	EC10- EC12	>EC12- EC16	>EC16- EC21	>EC21	
Sous bâtiment BUREAUX																					
Teneur limite (effet à seuil)	mg/kg ms	2,9E-1	3,1E-1	1,0E+0	1,8E-1	5,0E-2	1,3E+0	1,4E+0	3,6E+0	1,0E+0	1,8E+0	4,4E+0	PVL	PVL	9,5E+1	9,5E+1	5,2E+0	5,2E+0	6,5E+0	PVL	PVL
Teneur limite (effet sans seuil)	mg/kg ms	1,8E+0	PVL	9,0E-1	3,1E-1	3,0E-1	PVL	7,2E-1	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL
Teneur limite avant contrôle de la saturation	mg/kg ms	2,9E-1	3,1E-1	9,0E-1	1,8E-1	5,0E-2	1,3E+0	7,2E-1	3,6E+0	1,0E+0	1,8E+0	4,4E+0	PVL	PVL	9,5E+1	9,5E+1	5,2E+0	5,2E+0	6,5E+0	PVL	PVL
Teneur limite sol	mg/kg ms	2,9E-1	3,1E-1	9,0E-1	1,8E-1	5,0E-2	1,3E+0	7,2E-1	3,6E+0	1,0E+0	1,8E+0	4,4E+0	PVL	PVL	9,5E+1	PVL	5,2E+0	5,2E+0	PVL	PVL	PVL
Equivalent air du sol	mg/m3	1,1E+3	2,2E+2	1,3E+3	2,8E+2	4,3E+1	8,1E+2	2,6E+2	8,6E+2	2,8E+2	9,6E+1	4,5E+1	PVL	PVL	5,9E+5	PVL	9,7E+3	2,3E+3	PVL	PVL	PVL
Sous bâtiment INDUSTRIEL / COMMERCIAL																					
Teneur limite avant contrôle de la saturation	mg/kg ms	8,1E-1	8,7E-1	2,5E+0	5,1E-1	1,4E-1	3,8E+0	2,0E+0	1,0E+1	2,9E+0	5,1E+0	1,2E+1	PVL	PVL	2,7E+2	2,7E+2	1,4E+1	1,4E+1	1,8E+1	PVL	PVL
Teneur limite sol	mg/kg ms	8,1E-1	8,7E-1	2,5E+0	5,1E-1	1,4E-1	3,8E+0	2,0E+0	1,0E+1	2,9E+0	5,1E+0	1,2E+1	PVL	PVL	PVL	PVL	1,4E+1	PVL	PVL	PVL	PVL
Equivalent air du sol	mg/m3	3,1E+3	6,3E+2	3,6E+3	7,9E+2	1,2E+2	2,3E+3	7,2E+2	2,4E+3	7,8E+2	2,7E+2	1,3E+2	PVL	PVL	PVL	PVL	2,7E+4	PVL	PVL	PVL	PVL
Zone récréative + habitations (ZAC), terres en ext. sous couverture terre végétale (30 cm)																					
Teneur limite avant contrôle de la saturation	mg/kg ms	1,6E+0	2,2E+0	4,9E+0	9,8E-1	2,9E-1	1,0E+1	3,9E+0	2,0E+1	2,0E+1	6,3E+1	2,6E+2	PVL	PVL	5,2E+2	5,2E+2	3,5E+1	8,9E+1	2,7E+2	PVL	PVL
Teneur limite	mg/kg ms	1,6E+0	2,2E+0	4,9E+0	9,8E-1	2,9E-1	1,0E+1	3,9E+0	2,0E+1	2,0E+1	6,3E+1	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL
Equivalent air du sol	mg/m3	6,0E+3	1,5E+3	7,0E+3	1,5E+3	2,5E+2	6,2E+3	1,4E+3	4,7E+3	5,5E+3	3,3E+3	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL
Zone industrielle, terres sous TV ou parking, exposition employé en extérieur (mi-temps) et en intérieur																					
Teneur limite avant contrôle de la saturation	mg/kg ms	1,5E+1	2,0E+1	4,6E+1	9,2E+0	2,7E+0	9,6E+1	3,7E+1	1,8E+2	1,9E+2	5,9E+2	2,5E+3	PVL	PVL	4,8E+3	4,8E+3	3,3E+2	8,3E+2	2,5E+3	PVL	PVL
Teneur limite sol	mg/kg ms	1,5E+1	2,0E+1	4,6E+1	9,2E+0	2,7E+0	9,6E+1	3,7E+1	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL
Equivalent air du sol	mg/m3	5,6E+4	1,4E+4	6,5E+4	1,4E+4	2,4E+3	5,8E+4	1,3E+4	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL
Unité		Naphtalène	Acénaphthylène	Acénaphthène	Fluorène	Phénanthrène	Anthracène	Fluoranthène	Pyrène	BaA	Chrysène	BbF	BkF	BaP	DahA	BghP	IcdP	Phénol	PCB (7)	PCB-A1254	
Sous bâtiment BUREAUX																					
Teneur limite (effet à seuil)	mg/kg ms	2,6E-1	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	7,7E+0	6,0E+0	1,2E+1	
Teneur limite (effet sans seuil)	mg/kg ms	5,5E-2	3,3E+0	2,5E+0	4,0E+0	9,3E+0	8,1E-1	3,6E+1	3,6E+1	1,3E+0	1,3E+1	2,6E+1	3,7E+1	5,6E+0	3,2E+1	2,1E+2	7,6E+7	PVL	6,8E-1	1,4E+0	
Teneur limite avant contrôle de la saturation	mg/kg ms	5,5E-2	3,3E+0	2,5E+0	4,0E+0	9,3E+0	8,1E-1	3,6E+1	3,6E+1	1,3E+0	1,3E+1	2,6E+1	3,7E+1	5,6E+0	3,2E+1	2,1E+2	7,6E+7	7,7E+0	6,8E-1	1,4E+0	
Teneur limite sol	mg/kg ms	5,5E-2	3,3E+0	2,5E+0	4,0E+0	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	7,7E+0	6,8E-1	1,4E+0	
Equivalent air du sol	mg/m3	2,3E-1	3,8E+0	4,9E+0	3,2E+0	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	7,2E-1	1,4E-3	2,8E-3	
Sous bâtiment INDUSTRIEL / COMMERCIAL																					
Teneur limite avant contrôle de la saturation	mg/kg ms	1,5E-1	9,2E+0	7,0E+0	1,1E+1	2,6E+1	2,3E+0	9,9E+1	1,0E+2	3,5E+0	3,6E+1	7,2E+1	1,0E+2	1,6E+1	9,0E+1	5,8E+2	2,1E+8	2,2E+1	1,9E+0	3,8E+0	
Teneur limite sol	mg/kg ms	1,5E-1	9,2E+0	7,0E+0	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	2,2E+1	1,9E+0	3,8E+0	
Equivalent air du sol	mg/m3	6,5E-1	1,1E+1	1,4E+1	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	2,0E+0	4,0E-3	7,9E-3	
Zone récréative + habitations (ZAC), terres en ext. sous couverture terre végétale (30 cm)																					
Teneur limite avant contrôle de la saturation	mg/kg ms	1,7E+0	1,4E+2	1,0E+2	2,1E+2	8,2E+2	6,5E+1	8,2E+3	8,4E+3	5,5E+2	5,4E+3	2,4E+3	3,6E+3	4,0E+2	1,7E+3	6,9E+4	2,9E+4	1,6E+2	7,0E+1	1,4E+2	
Teneur limite	mg/kg ms	1,7E+0	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	1,6E+2	PVL	PVL	
Equivalent air du sol	mg/m3	7,4E+0	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	1,5E+1	PVL	PVL	
Zone industrielle, terres sous TV ou parking, exposition employé en extérieur (mi-temps) et en intérieur																					
Teneur limite avant contrôle de la saturation	mg/kg ms	1,3E+1	1,1E+3	7,8E+2	1,6E+3	6,8E+3	5,4E+2	7,1E+4	7,3E+4	4,8E+3	4,7E+4	2,1E+4	3,1E+4	3,5E+3	1,5E+4	6,0E+5	2,5E+5	1,5E+3	3,1E+3	6,3E+3	
Teneur limite sol	mg/kg ms	1,3E+1	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	1,5E+3	PVL	PVL	
Equivalent air du sol	mg/m3	5,7E+1	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	1,4E+2	PVL	PVL	

PVL: Pas de Valeur Limite

Tableau 10 : Concentrations limites calculées dans les terres excavées au regard du risque sanitaire

7. PROPOSITION ET FIXATION DE VALEURS SEUILS

Le GTT « terres excavées » a choisi, pour la simplicité des valeurs seuils et des procédures de suivi, de retenir des valeurs seuils exprimées uniquement en concentrations dans les sols (cf. §. 6.2 pour les concentrations dans l'air du sol équivalentes aux teneurs limites calculées).

Le passage des teneurs limites calculées aux valeurs seuils proposées a fait intervenir différents choix intégrant des options de gestion retenues par le GTT « terres excavées », et en particulier le choix de fixer des valeurs seuils pour toutes les substances retenues même lorsque le calcul de risque conclut à une absence de teneur limite.

Ces choix et le processus d'adaptation appliqué sont détaillés en Annexe 4. En particulier :

- Pour les HAP, seul le naphtalène a été retenu par le GTT « terres excavées » pour l'établissement de valeurs seuils, en tant que traceur pertinent. Les autres HAP, plus lourds et donc moins concernés par le transfert de vapeurs, sont couverts par les valeurs seuils retenues pour le naphtalène et pour les hydrocarbures C10-C40.
- Pour les hydrocarbures C5-C10 et C10-C40, l'INERIS a regroupé en deux valeurs les teneurs limites calculées sur les différentes coupes aliphatiques et aromatiques, au *pro rata* des proportions respectives des différentes coupes au sein de ces deux groupes d'hydrocarbures C5-C10 et C10-C40 selon deux hydrocarbures de référence (essence pour C5-C10 et gasoil pour C10-C40). L'INERIS a reconstitué ces proportions (de manière largement indicative) à partir des compositions d'hydrocarbures types établies par le TPHCWG (1997a). Préalablement à ces regroupements, des seuils ont été affectés à différentes coupes ne présentant pas de valeur limite (PVL) à l'issue des calculs (teneurs limites au-delà de la saturation). Pour assurer la cohérence des valeurs retenues entre substances et scénarios, l'INERIS a proposé et appliqué le choix de se baser sur les teneurs limites avant contrôle de la saturation.
- Pour les PCB, en l'absence de teneur limite calculée pour la plupart des scénarios (et compte tenu des incertitudes importantes sur les valeurs d'entrée : cf. Annexe 3), le choix du groupe de travail s'est porté sur une valeur seuil correspondant à un bruit de fond urbain plutôt que sur une valeur « sanitaire ». Ce choix est en particulier cohérent avec la démarche de l'IEM pour la gestion des sols pollués, compte tenu que la réutilisation des terres excavées en zone d'aménagement est prévue essentiellement en milieu urbain (présentant un fond anthropique particulièrement marqué). Dans une optique opérationnelle, une valeur relativement haute de bruit de fond urbain (90^{ème} percentile des données de bruit de fond « avec apports » [d'origine naturelle ou anthropique] disponibles sur le Grand Lyon). A noter que, dans le cadre de l'application du Guide de réutilisation des terres excavées, le critère supplémentaire de maintien de la qualité des sols sur le site receveur¹⁷

¹⁷ « La réutilisation de terres excavées sur un site receveur n'est possible que si les substances polluantes caractérisées au sein des terres présentent des teneurs inférieures à celles caractérisant le fond géochimique du site receveur. Un dépassement de 50 % des teneurs en

s'appliquera en outre pour les PCB comme pour les autres substances.

- Le groupe de travail technique « terres excavées » a souhaité élargir la teneur limite calculé pour le phénol à l'indice phénol, plus couramment mesuré. Compte tenu des éléments recueillis sur les composantes mesurées par l'indice phénol et leurs propriétés, l'INERIS propose :
 - de limiter l'élargissement de la valeur seuil du phénol, à travers l'indice phénol, aux seuls phénol et crésols ;
 - de maintenir la même valeur du seuil, compte tenu du caractère plus toxique et mobile du phénol.

En outre, pour limiter le nombre de valeurs seuils, le groupe de travail « terres excavées » a choisi de regrouper les paires de scénarios sous bâtiment et hors emprise du bâti sur la base du plus conservatoire de chaque paire. Les valeurs seuils ainsi retenues sont donc "protectrices" pour les deux scénarios sous bâti (bureau et industriel/commercial) et les deux scénarios hors emprise du bâti (sous couverture de terre, bitume voire béton) considérés ici.

Les valeurs seuils ont ensuite été arrondies. Les valeurs seuils ainsi obtenues sont récapitulées dans le Tableau 11 ci-après.

En mg/kg MS	Valeurs seuils sous bâtiment		Valeurs seuils pour réutilisation sous couverture*	Origine
	Bureau	Industriel/ Commercial		
C5-C10	200	550	1100	Calcul de risque par coupes et extrapolations
C10-C40	50	170	1650	
Benzène	0,05	0,15	0,30	Calcul de risque
Toluène	1,5	3,5	10	
Ethylbenzène	0,5	2	4	
Xylènes	3,5	10	20	
Naphtalène	0,05	0,15	1,5	
PCE	0,2	0,5	1	
TCE	0,9	2,5	5	
cis-DCE	0,3	0,9	2	
CV	0,3	0,8	1,5	
PCB (7)	0,1	0,1	0,1	
Phénol et crésols (Indice phénol)	8	20	160	Calcul de risque phénol, vérification crésols

* couverture : revêtement bitumineux ou béton, ou terre végétale (30 cm).

PCB (7): PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153 et 180.

Tableau 11 : Valeurs seuils proposées intégrant les choix du GTT « terres excavées »

polluants déjà présents sur le site receveur pourra être toléré pour un maximum de 5 composés (...) » (Blanc et al., 2012).

Dans un deuxième temps, le ministère du Développement Durable a fixé des valeurs seuils ajustées compte-tenu des retours du Groupe de Travail Technique et du Groupe de Travail Plénier « terres excavées » :

- Alignement à la baisse des valeurs seuils « terres excavées » maximales (*i.e.* sous couverture) sur les seuils d'acceptation en installations de stockage de déchets inertes ("seuils ISDI")¹⁸. Cela a concerné les TEX et les hydrocarbures C10-C40 ; les valeurs seuils sous bâtiments ont été alignées à la baisse de façon proportionnelle. Cela a concerné les seuils TEX.
- Maintien du seuil des hydrocarbures C5-C10 sous le seuil des hydrocarbures C10-C40, comme communément rencontrée dans les études de site.
- Abaissement de la valeur seuil "phénol et crésols" sous couverture à un niveau considéré plus acceptable.

Les valeurs seuils ainsi fixées sont reportées dans le Tableau 12 ci-après.

En mg/kg MS	VS1 : Valeurs seuils sous bâtiment (bureau, industriel, commercial)	VS2 : Valeurs seuils pour réutilisation sous couverture*
C ₅ -C ₁₀	40 ***	400 ***
C ₁₀ -C ₄₀	50 ***	500 ***
Benzène	0,05	0,3
Somme TEX (Toluène, Ethylbenzène, Xylènes)	2,5 ***	6 ***
Naphtalène	0,05	1,5
Tétrachloroéthène	0,2	1
Trichloroéthène	0,9	5
cis-Dichloroéthène	0,3	2
Chlorure de vinyle	0,3	1,5
PCB (7)	0,1 **	0,1 **
Phénols et crésols (indice phénol)	8 ***	20 ***

* Couverture : revêtement bitumineux ou béton, ou terre végétale (30 cm).

PCB (7): PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153 et 180

** Estimation haute (90^{ème} centile) d'un bruit de fond urbain.

*** Valeurs ajustées par le ministère du Développement Durable compte-tenu des retours du Groupe de Travail Technique et du Groupe de Travail Plénier « terres excavées ».

Tableau 12 : Valeurs seuils fixées par le ministère du Développement Durable

¹⁸ Arrêté du 28 octobre 2010 relatif aux installations de stockage de déchets inertes. J.O. du 16/11/2010.

8. BILAN DES INCERTITUDES

Compte-tenu des discussions précédentes, les facteurs clés qui influencent les valeurs seuils élaborées sont les suivants :

- Configuration du site, notamment l'absence de vide sanitaire dans les bâtiments : un vide sanitaire peut conduire à un relèvement des teneurs limites calculées dans les sols d'un facteur supérieur à 10.
- Fraction de carbone organique (foc) et granulométrie du sol¹⁹, et coefficient de partage carbone organique / eau des substances (Koc) : l'impact des variations de ces paramètres sur les valeurs seuils élaborées reste nul ou limité dans le cadre du choix de départ d'une configuration de site générique conservatoire. En revanche, le choix initial de terres très perméables est déterminant, et l'impact de ces trois facteurs pourra redevenir quasi-linéaire dans des configurations de site nettement moins pénalisantes, en particulier pour des terres (terres excavées ou couche de terres saines au dessus) peu perméables ou peu diffusive (resp. pour les scénarios sous bâtiment et hors emprise de bâtiments)²⁰.
- Epaisseur de la couche de terres excavées appliquée : pour les substances volatiles (terres hors emprise des bâtiments) à semi-volatiles (terres sous bâtiment), ce paramètre intervient de façon linéaire dans les teneurs limites calculées, dans la configuration de site conservatoire retenue.
- Concept du modèle VOLASOIL de convection de vapeurs et paramétrisation (taux de fissuration, taille des fissures, d'où la valeur de perméabilité) du modèle VOLASOIL. L'ampleur de l'incertitude associée peut être considérée de l'ordre d'un facteur 10 à 100 (Arcadis, 2004; Provoost, et al., 2009 ; Hulot et al., 2010). Il est généralement considéré que les modèles de transfert tels que Johnson & Ettinger et surtout VOLASOIL sont *a priori* conservatoires, mais de telles affirmations sont à considérer avec prudence en l'absence de validation détaillée et compte tenu de quelques contre-exemples apparents²¹ rencontrés (Hulot et al., 2010; Hers et al., 2002 ; Wijnen et Lijzen, 2006). Dans cette étude, le comportement sur-conservatoire du modèle initial a été tempéré par la modélisation en source décroissante finie, mais l'épuisement d'une source de 3 m, et potentiellement d'une épaisseur bien plus importante, sur une durée relativement rapide (1 an) pour les substances volatiles indique que cette modélisation reste sur-conservatoire. Toutefois, l'impact de ce sur-conservatisme du modèle sur les teneurs limites dans les sols calculées est ici

¹⁹ Via essentiellement la perméabilité pour les scénarios de terres appliquées sous bâtiment, et la diffusivité pour des terres appliquées hors emprises de bâtiments.

²⁰ Les seuils agrégés des hydrocarbures C5-C10 sont de fait issus de teneurs limites par coupes avant contrôle de la saturation de l'équilibre multiphase (ce n'est pas le cas des seuils des hydrocarbures C10-C40). Dans le scénario sous bâtiment, ces seuils sont pour l'essentiel déterminés par l'épuisement de la source (même avec une foc accrue). Dans le scénario hors emprise du bâti, ce mécanisme est moins marqué. L'impact de variations de la foc du sol et des variantes de modélisation (source décroissante ou non) est de ce fait plus sensible pour le seuil agrégé des hydrocarbures C5-C10 hors emprise du bâti.

²¹ Apparents car affectés par des incertitudes métrologiques potentiellement déterminantes dans cette appréciation.

très limité pour les substances volatiles (COHV, BTEX)²² et pour les substances peu volatiles ou toxiques (« Pas de Valeur Limite »). De fait, l'impact du choix de la modélisation en source descendante (développement INERIS de VOLASOIL 2008) sur les teneurs limites calculées est ici nul sur la grande majorité des substances, et limité à un facteur 2,7 sous bâtiment et 1,4 sous couverture en extérieur²⁰.

- Paramètres de la dispersion en extérieur et en intérieur : nous avons repris de CSOIL/VOLASOIL et de source réglementaire des valeurs "classiques", *a priori* conservatoires, de ventilation des pièces et de vitesse du vent (3 m/s). Des conditions ou des choix locaux de ventilation renforcée, voire une modélisation de la dispersion en extérieur affinée (prenant en compte les reliefs et obstacles sur le terrain), pourraient amener à des relèvements de seuils dans les sols.
- Valeurs Toxicologiques de Référence, qui interviennent de façon linéaire dans les teneurs limites calculées. Elles peuvent varier entre organismes d'un ordre de grandeur environ. Le mode de sélection retenu est *a priori* conservatoire mais évite les valeurs considérées comme excessives. Des choix approfondis sur la base d'une évaluation des modes d'élaboration des VTR pourraient conduire à certaines teneurs limites calculées plus élevées.
- Pour les hydrocarbures C5-C10 et C10-C40, intégration de teneurs limites avant contrôle de la saturation de l'équilibre multiphase au sein du sol source : l'application stricte d'un tel contrôle conduirait à des seuils C5-C10 moins cohérents entre scénarios, voire à une absence de valeurs seuils dans certains scénarios, suivant l'option retenue pour l'agrégation des teneurs limites des différentes coupes des hydrocarbures C5-C10.

9. REFERENCES CITEES

Arcadis, 2004. Executive Summary Report. Risk assessment Comparison Study. Arcadis Geralthy and Miller International. April 2004.

ATSDR. Toxicological profile. <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles>.

Bakker J, Lijzen JPA, Otte PF, van Wijnen HJ, Swartjes FA, Baars BJ, 2006. Site-specific human-toxicological risk assessment of soil contamination with volatile compounds. RIVM, Bilthoven RIVM report. 2008.

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

Blanc C. avec la participation de F. Lefevre (MEDDTL), G. Boissard, M. Scamps (BRGM) et B. Hazebrouck (INERIS), 2012. Guide de réutilisation hors site des terres excavées en technique routière et dans des projets d'aménagement, version n°4, Rapport Brgm-RP-60013-FR, 53p. Février 2012.

²² Du fait de la configuration de site conservatoire retenue : un épuisement rapide de la source de 3 m sous dalle peut correspondre à une certaine réalité, le fait que le modèle accélère cet épuisement restant alors sans impact.

Boissard G. avec la collaboration de Bellenfant G., Blanc C., Guyonnet D., et Merly C., 2012. Guide d'utilisation de l'outil HYDROTEX - Réutilisation hors site des terres excavées en technique routière et dans des projets d'aménagement. Rapport final. BRGM/RP-60227-FR, 76 p, 9 fig., 16 tab., 2 ann. Février 2012.

BRGM, 2010. Valeurs Jalons Air (pour les diagnostics de bâtiments accueillant du public établis sur d'anciens sites industriels). Fichier Excel transmis par D. Hubé, courriel du 11/06/2010.

CCME, 1994. A Protocol for the Derivation of Ecological Effects-Based and Human Health-Based Soil Quality Criteria for Contaminated Sites. CCME Subcommittee on Environmental Quality Criteria for Contaminated Sites. Final draft, July 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.

Grand Lyon, 2010. Base de données sur le bruit de fond des sols sur le territoire du Grand Lyon. Notice 8 p. Juillet 2010.

Grand Lyon, 2011. Courriel sur le bruit de fond en PCB sur le Grand Lyon. Pierre Clottes. 19/5/2011.

Hazebrouck, 2000. Evaluation Détaillée des Risques liés à la contamination des sols par les activités d'un dépôt pétrolier en Languedoc Roussillon. ARCADIS Trischler & Partner. 164.500.99 - confidentiel- Version 2. B. Hazebrouck. Décembre 2000.

Hazebrouck B., Hulot C., Gay G., 2005. Vapor emissions from contaminated soils into buildings: developments of the VOLASOIL model for a multilayer soil. Consoil 2005: proceedings of the 9th international FZK/TNO conference on soil-water systems, 3-7 October 2005, Bordeaux, France. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe, 2005. pp 1225-1233. Uhlmann O., Annokke G.J., Arendt F. (Eds.).

Hers I., Zapf-Gilje R., Evans D., Li L., 2002. Comparaison, Validation, and Use of Models for Predicting Indoor Air Quality from Soil and Groundwater Contamination. Soil and Sediment Contamination, 11 (4), pp. 491-527.

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. Proceedings of the 11th International UFZ-Deltares/TNO conference on management of soil, groundwater & sediments (CONSOIL 2010), 22-24 september 2010, Salzburg, Austria. Uhlmann O., Annokke G.J., Arendt F. (Eds.).

INERIS, 2003-2006. Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAPs). Evaluation de la relation dose-réponse pour des effets cancérigènes: Approche substance par substance (facteurs d'équivalence toxique - FET) et approche par mélange. Evaluation de la relation dose-réponse pour des effets non cancérigènes: Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR). Rapport final. 18.12.2003, mise à jour 03.01.2006. B. Doornaert - Annick Pichard. INERIS-DRC-03-47026-ETSC-BDo-N°03DR177.doc - Version1-3. <http://www.ineris.fr>.

INERIS, 2010a. Action Substance - Polychlorobiphényles (PCB). DRC-10-104007-02770A. André THOUZEAU. 02/03/2010.

NERIS, 2010b. Cartographie croisée de la qualité des milieux et des activités industrielles dans le département de la Loire. DRC-10-109816-10161A. S. Denys. 26/11/10.

INERIS, 2010c. Jeux d'équations pour la modélisation des expositions liées à la contamination d'un sol ou aux émissions d'une installation industrielle. DRC-08-94882-16675B. R. Bonnard. 01 / 08 / 2010. www.ineris.fr.

Johnson Paul C. and Ettinger Robert A., 1991. Heuristic model for predicting the intrusion rate of contaminant vapors into buildings. Environmental Science and Technology, vol. 25 (8), pp. 1445-1452.

Jury W.A. Groven R., Spencer W.F., Farmer W.J., 1980. Modeling Vapor Losses of Soil. Incorporated Triallate. Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 44, pp. pp. 445-450.

Jury W.A., Spencer W.F., et Farmer W.J., 1983. Use of Models for Assessing Relative Volatility, Mobility, and Persistence of pesticides and Other Trace Organics in Soil Systems. Hazard Assessment of Chemicals: Current Developments, Vol.2. Academic Press, Inc.

de Marsily, 1981. Hydrogéologie quantitative. Ed. Masson. 1981.

Lijzen, Johannes, 2011. Rencontre technique RIVM-BRGM-INERIS sur la gestion des terres excavées. Bilthoven. Février 2011.

MEDAD, 2007a. Circulaire du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable relative aux « Installations classées ; prévention de la pollution des sols ; gestion des sols pollués, 8 février 2007.

MEDAD, 2007b. Circulaire du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable relative aux « Sites et sols pollués ; modalités de gestion et de réaménagement des sites pollués », 8 février 2007.

Meijer, S. N., Ockenden W. A., Sweetman A., Breivik K., Grimalt J. O., Jones K. C., 2003. Global Distribution and Budget of PCBs and HCB in Background Surface Soils : Implications for Sources and Environmental Processes. Environmental science & technology, 2003, vol. 37, no4, pp. 667-672.

Motelay-Massei A., Ollivon D., Garban B., Teil M.J., Blanchard M., Chevreuil M., 2004. Distribution and spatial trends of PAHs and PCBs in soils in the Seine River basin, France. Chemosphere 55 (2004) 555-565.

Provoost J., Reijnders L., Swartjes F., Bronders J., Seuntjens P., Lijzen J., 2009. Accuracy of seven vapour intrusion algorithmes for VOC in groudwater ? J. Soils Sediments, 9 :62-73.

Rincent, 1995. Communication au groupe de travail "Hygiène et Santé publique" du Ministère de l'environnement. 25/10/1995

Rippen, 1996. Handbuch Umweltchemikalien - 37. Erg. Lfg. 12/1996.

Shell Global Solutions, 1995. The concepts of HESP. Reference Manual, Human Exposure to Soil Pollutants, version 2.10b. Jan 1995.

Spitz Karl-Heinz, Morenno Joanna, 1996. A practical Guide to groundwater and solute transport modeling. Karl-Heinz Spitz, Joanna Morenno, John Wiley & sons, Inc. Ed. 1996.

TPHCWG, 1997a. Total Petroleum Hydrocarbons Criteria Working Group. Selection of Representative TPH Fractions Based on Fate and Transport Considerations. Amherst Scientific Publishers. 1997.

TPHCWG, 1997b. Total Petroleum Hydrocarbons Criteria Working Group. Development of Fraction Specific Reference Doses (RfDs) and Reference Concentrations (RfCs) for Total Petroleum Hydrocarbons (TPH). Amherst Scientific Publishers. 1997

US EPA. Integrated Risk Information System (IRIS) on line.

US EPA, 1994. Technical Background Document for Draft Soil Screening Level Guidance. Office of Emergency and Remedial Response. EPA, février 1994. Interim document.

US EPA, 1996. Soil Screening Guidance: Technical Background Document. 9355.4-17A, Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response,

US EPA, 2000. Johnson et Ettinger, 1991. Model for subsurface vapor intrusion into buildings. Users Guide US EPA 2000.

US EPA, 2004. user's guide for evaluating subsurface vapor intrusion into buildings. February 22, US EPA 2004.

USIRF, 2011. Courriels de M. F. Verhee en date du 09/05/11 et du 11/05/11.

Verschueren, Karel, 1997. Handbook on environmental data on organic chemicals, 3rd Edition. Van Nostrand Reinhold, 1997.

Waitz M.F.W.; J.I. Freijer; F.A. Swartjes, 1996. The VOLASOIL risk assessment model based on CSOIL for soils contaminated with volatile compounds. May 1996. RIVM. Report n° 75810014. <http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/715810014.pdf>.

Wijnen H.J., Lijzen J.P.A., 2006. Validation of the VOLASOIL model using air measurements from Dutch contaminated sites. Concentrations of four chlorinated compounds. RIVM report 7117041/2006.

10. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nb pages
Annexe 1	Modèles de transfert, d'exposition, et de risque	25 A4
Annexe 2	Caractéristiques des voies de transfert	10 A4
Annexe 3	Données physico-chimiques et toxicologiques des substances	10 A4
Annexe 4	Adaptation des teneurs limites calculatoires en valeurs seuils	12 A4
Annexe 5	Présentation des feuilles de calcul	7 A4
Annexe 6	Fichier de calcul (fichier électronique Excel®)	Fichier

Annexe 1 : Modèles de transfert, d'exposition, et de risque

ANNEXE 1 : MODELES DE TRANSFERT, D'EXPOSITION, ET DE RISQUE

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	3
1.1 Objectifs	3
1.2 Vue d'ensemble.....	3
1.3 Options de présentation	4
1.4 Hypothèses générales de modélisation.....	5
2. EQUILIBRE MULTIPHASE DANS LE SOL	5
2.1 Modèle conceptuel/ mécanismes	5
2.2 Paramètres et équations	6
3. EMISSIONS DE VAPEURS DANS L'AIR INTERIEUR ET EXTERIEUR	8
3.1 Modèle conceptuel général	8
3.2 Convection à travers la zone insaturée	9
3.2.1 Modèle conceptuel d'ensemble	9
3.2.2 Paramètres et équations.....	10
3.3 Diffusion et convection dans la zone insaturée	12
3.3.1 Modèle conceptuel/ mécanisme	12
3.3.2 Paramètres et équations locales	12
3.3.3 Résolution monocouche	14
3.3.4 Résolution multicouche.....	15
3.4 Adaptation du modèle en source décroissante finie.....	17
3.4.1 Solution numérique conservatoire (convection et diffusion).....	17
3.4.2 Solution analytique conservatoire (convection et diffusion)	19
3.4.3 Durée d'émission t à prendre en compte	21
3.5 Flux diffusif limite dans l'air.....	21
4. DISPERSIONS DANS L'AIR ATMOSPHERIQUE.....	22
4.1 Modèle conceptuel général	22
4.2 Dispersion dans l'air extérieur	22
4.3 Dispersion en intérieur	23
5. EXPOSITION DES PERSONNES A L'AIR ATMOSPHERIQUE ET EXPRESSION DES NIVEAUX DE RISQUE.....	23
6. BILAN, CALCUL DE LA TENEUR LIMITE DANS LES SOLS	25

Liste des figures

Figure 1: Modèle de Jury d'équilibre physique triphasique dans le sol.....	6
Figure 2: Modélisation générale de l'émission de vapeurs vers l'air atmosphérique.....	9
Figure 3: Transport convectif d'air vers l'intérieur d'un bâtiment (Waitz et al, 1996)	10
Figure 4: Modélisation de la diffusion et de la convection dans un sol multicouche	15
Figure 5: Modèle de la boîte pour la dispersion dans l'air extérieur.....	22

1. INTRODUCTION

1.1 OBJECTIFS

La modélisation traduit les concentrations au niveau des sources en concentration d'exposition puis en niveaux de risque au niveau des personnes concernées, dans une configuration (aménagements, usages) donnée du site prise comme configuration de long terme. Rappelons qu'elle n'indique qu'un risque potentiel théorique que l'on tend à rendre *a priori* conservatoire, et qui pourra être affiné ou contrôlé par les données de terrain (paramètres des lieux ou concentrations).

1.2 VUE D'ENSEMBLE

La modélisation suit le contaminant de la source jusqu'à la personne comme indiqué dans le schéma conceptuel en corps de texte. Elle est découpée en modules correspondant aux différents transferts entre milieux pour l'émission de vapeurs depuis le sol, puis à la traduction de l'exposition en niveaux de risque :

- équilibre triphasique dans le sol ;
- émission du sol vers l'air atmosphérique (extérieur ou intérieur) ;
- dispersion dans l'air atmosphérique ;
- exposition des personnes à l'air atmosphérique ;
- traduction de l'exposition en niveaux de risque.

La modélisation des transferts s'appuie sur le modèle hollandais CSOIL/VOLASOIL établi par le RIVM (van den Berg, 1994 ; Waitz *et al.*, 1996, Bakker *et al.*, 2008), adapté aux spécificités des scénarios retenus. La forme logiciel de ce modèle est par défaut d'application obligatoire en Hollande pour l'évaluation quantitative des risques sanitaires occasionnés par un site pollué. CSOIL intègre plusieurs voies d'exposition, dont le transfert de vapeurs par diffusion vers l'air intérieur et extérieur. VOLASOIL est un développement de CSOIL pour le transfert de vapeurs en intérieur. Il intègre en particulier le transport convectif (et diffusif) des vapeurs de polluants. Le modèle CSOIL de transfert de vapeurs est ainsi un cas particulier du modèle VOLASOIL, avec flux convectif nul. Il reste appliqué, dans le dispositif hollandais, au transfert de vapeurs vers l'air extérieur.

Pour l'émission de vapeurs dans l'air intérieur depuis une source sous la dalle, le modèle VOLASOIL est retenu plutôt que l'autre modèle également communément utilisé en Europe, Johnson et Ettinger (1991, US EPA, 2000, 2004) car il s'avère, dans divers cas que nous avons testés, plus conservatoire dans la situation d'une source proche de la dalle et d'un sol sous dalle fort perméable. Il nous apparaît en outre plus accessible à la compréhension, y compris pour comprendre ses biais. En tout état de cause, ces deux modèles sont considérés en temps qu'état de l'art accessible aux bureaux d'étude, leur validation reste partielle et ils sont tout deux améliorables. L'ampleur de l'incertitude associée peut être considérée de l'ordre d'un facteur 10 à 100 (Arcadis, 2004; Provoost, et al., 2009 ; Hulot et al., 2010). Il est généralement considéré que les modèles de transfert tels que Johnson &

Ettinger et surtout VOLASOIL sont a priori conservatoires, mais de telles affirmations sont à considérer avec prudence en l'absence de validation détaillée et compte tenu de quelques contre-exemples apparents¹ rencontrés (Hulot et al., 2010 ; Hers et al., 2002 ; Wijnen et Lijzen, 2006).

Pour tempérer certains excès sur-conservatoires de CSOIL/VOLASOIL, nous avons utilisé **une version avec source finie décroissante (épuiement de la source par le haut) de CSOIL/VOLASOIL, développée par l'INERIS** (Hulot et al., 2010). Ce sous-module "source finie décroissante" sera intégré dans l'outil de modélisation d'exposition multimédia en cours d'élaboration par l'INERIS (2010c), dans le module "transfert de vapeurs".

Le modèle d'équilibre multiphase et d'émission de vapeurs dans l'air extérieur utilisé dans CSOIL/VOLASOIL correspond à un standard bien établi que l'on retrouve dans les autres modèles (nonobstant des différences de présentation des équations : cf. § 2.1). Nous l'avons également adapté ici en source finie décroissante (épuiement de la source par le haut d'une part, contrôle de masse d'autre part) pour tempérer certains excès constatés sur les substances les plus volatiles (du type épuiement de la source par volatilisation sur une année).

1.3 OPTIONS DE PRESENTATION

La modélisation suit le contaminant de la source jusqu'aux personnes comme indiqué dans le schéma conceptuel (ici par transfert de vapeurs uniquement).

Pour la transparence de la modélisation, on a retenu les options de présentation suivantes :

- explications et commentaires nombreux (en italique ici) ;
- reprise dans une large mesure des notations de CSOIL/VOLASOIL ;
- découpage en modules correspondant aux différents transferts entre milieux, et par extension -et abus de langage- jusqu'au niveau de risque. Chaque module est caractérisé par un coefficient de transfert CT égal au rapport des concentrations entre le milieu d'arrivée et le milieu de départ² :

$$\text{Equation 1} \quad CT_{a \rightarrow b} = \frac{\text{concentration dans le milieu b}}{\text{concentration dans le milieu a}}$$

Le coefficient de transfert d'un milieu i à un milieu n (et jusqu'au risque) est alors égal au produit des coefficients des transferts successifs entre ces deux milieux (et jusqu'au risque). Ainsi, la concentration inhalée par les personnes est égale à la concentration dans le sol contaminé, multipliée par le produit de tous les coefficients de transferts entre le sol contaminé et les personnes. Cette présentation permet de bien séparer les différents modules. Elle implique cependant quelques modifications, purement formelles, des équations de

¹ Apparents car affectés par des incertitudes météorologiques potentiellement déterminantes dans cette appréciation.

² La concentration étant parfois remplacée par un flux (émission de vapeurs à la surface du sol) ou un niveau de risque (pour le transfert à l'homme et l'évaluation du risque).

CSOIL/VOLASOIL, qui sont exprimées en concentrations dans les différents milieux.

1.4 HYPOTHESES GENERALES DE MODELISATION

Comme dans le modèle VOLASOIL, la dégradation ou le lessivage de la pollution au niveau de la source au cours du temps ou lors du transfert n'est pas prise en compte dans la modélisation. Ce choix est à tendance conservatoire, en particulier pour des substances se dégradant rapidement dans la zone non saturée³, mais ne prend pas en compte la formation éventuelle de métabolites plus toxiques³.

L'atténuation de la source au cours du temps par volatilisation... est en revanche considérée dans la modélisation, comme décrit au chapitre 3.4 p 17.

2. EQUILIBRE MULTIPHASE DANS LE SOL

2.1 MODELE CONCEPTUEL/ MECANISMES

Les contaminants sont supposés se trouver en équilibre physique entre les différentes phases présentes dans le sol : produit en phase, dissout dans l'eau interstitielle (dont la nappe), adsorbé sur le sol, ou gazeux. Cette hypothèse est conservatoire :

- en soi, car elle ne prend pas en compte la cinématique des transferts, comme si l'équilibre était immédiat, ce qui n'est pas le cas ;
- pour les contaminations anciennes adsorbées, car elle ne tient pas compte des possibilités d'irréversibilité dans l'adsorption des contaminants au sol.

En l'absence de produit en phase, on considère l'équilibre triphasique entre la matrice solide du sol, l'eau interstitielle, et l'air interstitiel.

Dans CSOIL et VOLASOIL, cet équilibre triphasique est décrit par le modèle de fugacité de Mackay. Cette description est peu transparente. Pour plus de transparence, nous reprenons ici la présentation par le modèle « direct » de Jury universellement utilisé dans les dispositifs reconnus excepté CSOIL (par ex. Johnson et Ettinger), mathématiquement équivalent au modèle de fugacité de Mackay et partiellement repris par le RIVM hollandais lui-même dans le modèle VOLASOIL (Waitz *et al.*, 1996). Le modèle « direct », illustré sur la Figure 1, est fondé sur les deux équations de partage sol/eau (Equation 2) et air/eau (Equation 3) et sur le bilan de masse (Equation 4).

$$\text{Equation 2} \quad C_{ads} = K_d C_{pw}$$

$$\text{Equation 3} \quad C_{sa} = H C_{pw} \quad (\text{donc } C_{T_{pw \rightarrow sa}} = H)$$

$$\text{Equation 4} \quad C_s = C_{ads} + V_w / SD C_{pw} + V_a / SD C_{sa}$$

Cs: concentration massique totale dans le sol sec

[mg/kg_{ms}]

C_{ads}: concentration adsorbée sur la phase solide

[mg/kg_{ms}]

C_{pw}: concentration dans l'eau interstitielle

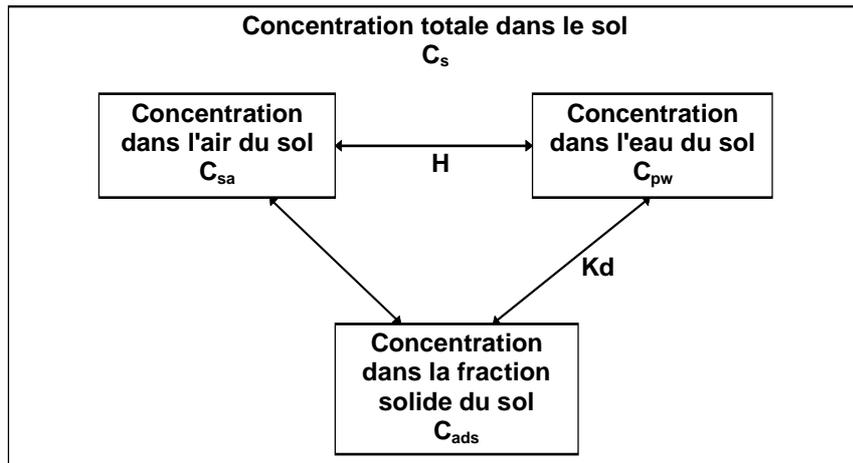
[mg/l_{pw}]

C_{sa}: concentration dans l'air du sol

[mg/l_{sa}]

³ Pour les solvants chlorés, le risque de formation en chlorure de vinyle est souvent avancé. Toutefois, le chlorure de vinyle est fortement suspecté de se dégrader rapidement dans la zone non saturée (retour d'expérience INERIS, approfondissements en cours).

Figure 1: Modèle de Jury d'équilibre physique triphasique dans le sol



2.2 PARAMETRES ET EQUATIONS

Paramètre	Symbole	Unité
Fraction volumique d'eau/d'air dans le sol	Vw/Va	l_{pw}/l_{sol} ou l_{sa}/l_{sol}
Porosité du sol	n	-
Teneur (massique) en eau	w	kg_{pw}/kg_{ms}
Teneur (massique) en matière sèche	fms	kg_{ms}/kg_{mh}
Densité apparente (sol humide en place)	ρ	kg_{mh}/l
Densité du sol sec en place	SD	kg_{ms}/l
Solubilité dans l'eau	S	mg/l
Concentration de saturation dans l'air d'un composant pur	Sa	mg/l
Concentration de saturation dans le sol du composant pur (sol donné)	Ss	mg/kg _{ms}
Teneur de saturation dans l'eau de la fraction molaire	Cpw _{sat}	mg/l
Teneur de saturation dans l'air de la fraction molaire	Csa _{sat}	mg/l
Fraction molaire dans le mélange	X	mol/mol
Concentration de saturation dans le sol de la fraction molaire	Cs _{sat}	mg/kg _{ms}
Indice de saturation	IS	(mg/l)/(mg/l)
Coefficient de partage carbone organique / eau	Koc	(mg/kg _{OC})/(mg/l _w)
Coefficient de partage octanol/eau	Kow	(mg/l _{oct})/(mg/l _w)
Teneur en carbone organique (OC) dans le sol	foc	kg _{OC} /kg _{ms}
Coefficient de partage solide/liquide	Kd	(mg/kg _{ms})/(mg/l _w)
Constante de Henry de partage air/eau	H	(mg/l _a)/(mg/l _w)
Coefficient de transfert du sol à l'eau interstitielle	CT _{s → pw}	(mg/l _{pw})/(mg/kg _{ms})
Coefficient de transfert du sol à l'air du sol	CT _{s → sa}	(mg/l _{sa})/(mg/kg _{ms})
Coefficient de transfert de l'eau interstitielle à l'air du sol	CT _{pw → sa}	(mg/l _{sa})/(mg/l _{pw})

Equation 5 $SD = \rho fms$

Equation 6 $Vw = SD w = SD (1-fms) / fms$

Equation 7 $Va = n - Vw = n - SD (1-fms) / fms$

D'un point de vue opérationnel, cette dernière équation est à utiliser avec particulièrement de prudence pour estimer Va à partir de mesures : elle est très sensible à de faibles variations de la valeur de n, SD, fms.

D'où: $Cs = (Kd + Vw / SD + H Va / SD) Cpw = \frac{Kd + Vw / SD + H Va / SD}{H} Csa,$

d'où les coefficients de transferts du sol (concentration totale) vers:

Equation 8 l'eau interstitielle: $CT_{s \rightarrow pw} = \frac{1}{Kd + Vw / SD + H Va / SD}$

Equation 9 l'air du sol: $CT_{s \rightarrow sa} = \frac{H}{Kd + Vw / SD + H Va / SD}$

Le coefficient de partage solide/liquide Kd est donné par la formule de CSOIL :

Equation 10 $Kd = f_{oc} K_{oc}$

Cette formule ne prend en compte que la matière organique comme adsorbeur de contaminants organiques. Elle tend ainsi à sous-estimer le Kd , ce qui est pénalisant. D'après le CCME (1994), le domaine de validité de l'Equation 10 correspond à une f_{oc} comprise entre 0,001 et 0,17.

L'équilibre triphasique de la Figure 1 est limité par la saturation de l'eau interstitielle : au-delà de la saturation⁴, les teneurs dans l'eau et l'air du sol sont limitées aux teneurs de saturation. Pour un produit seul, ces teneurs de saturation sont la solubilité S dans l'eau, et $S_a = H \times S$ dans l'air, correspondant à la concentration (totale) dans le sol à la saturation de l'équilibre triphasique, S_s , égale à $S / CT_{s \rightarrow pw}$.

Pour un mélange, la teneur à saturation d'un composant du mélange est la solubilité du produit pur multipliée par la fraction molaire du composant dans ce mélange (selon la loi de Raoult):

Equation 11 $C_{pw_{sat,i}} = X_i S_i$, et $C_{sa_{sat,i}} = X_i S_{a,i}$ avec:

Equation 12 $X_i = \frac{C_{phas_i} / M_i}{\sum C_{phas_j} / M_j} = \frac{C_{s_i} / M_i}{\sum C_{s_j} / M_j}$, avec:

C_{phas} : concentration massique dans la phase [mg/kg ou mg/l]

La fraction molaire X_i d'une substance dans un mélange s'obtient également à partir des teneurs dans l'eau et l'air du sol, via les coefficients de transfert:

Equation 13 $X_i = \frac{C_{pw_i} / CT_{s \rightarrow pw,i} / M_i}{\sum C_{pw_j} / CT_{s \rightarrow pw,j} / M_j}$ hors saturation, $X_i = C_{pw_i} / S_i$ à la saturation

Equation 14 $X_i = \frac{C_{sa_i} / CT_{s \rightarrow sa,i} / M_i}{\sum C_{sa_j} / CT_{s \rightarrow sa,j} / M_j}$ hors saturation, $X_i = C_{sa_i} / S_{a,i}$ à la saturation

Les teneurs de saturation dans l'eau et l'air sont atteintes dès que la concentration (totale) de saturation dans le sol $C_{s_{sat}}$ est atteinte :

Equation 15 $C_{s_{sat}} = C_{pw_{sat}} / CT_{s \rightarrow pw} = X_i S_s$

⁴ Et même aux abords de la saturation, les relations linéaires de l'Equation 2 et de l'Equation 3 s'infléchissant peu à peu vers le plateau de saturation des concentrations dans les milieux aqueux et gazeux. Cette l'inflexion n'est pas prise en compte, ce qui est conservatoire (surestimation des teneurs dans l'eau et dans l'air du sol).

D'où les procédures suivantes de contrôle de la saturation appliquées dans la modélisation :

- Pour les calculs des expositions et de risques : calculs effectués avec "min (C, C_{sat})" pour les voies de transfert en phase dissoute ou vapeur ; affichage de l'atteinte ou non de la saturation (onglet "3phas" du fichier Excel).
- Pour le calcul (inverse) des teneurs limites dans les sols : contrôle que la valeur calculée reste sous C_{sat} ; le contraire signifie que la limite de risque fixée ne peut être atteinte pour le contaminant et la voie considérés quelle que soit la concentration du contaminant dans la source considérée : inscription d'une absence de valeur limite (PVL).
- En revanche, *dans une optique de simplification (notamment pour éviter des teneurs limites interdépendantes)*, la Loi de Raoult n'est pas appliquée ici, ce qui est légèrement conservatoire (écrêtage plus haut des teneurs limites).

3. EMISSIONS DE VAPEURS DANS L'AIR INTERIEUR ET EXTERIEUR

3.1 MODELE CONCEPTUEL GENERAL

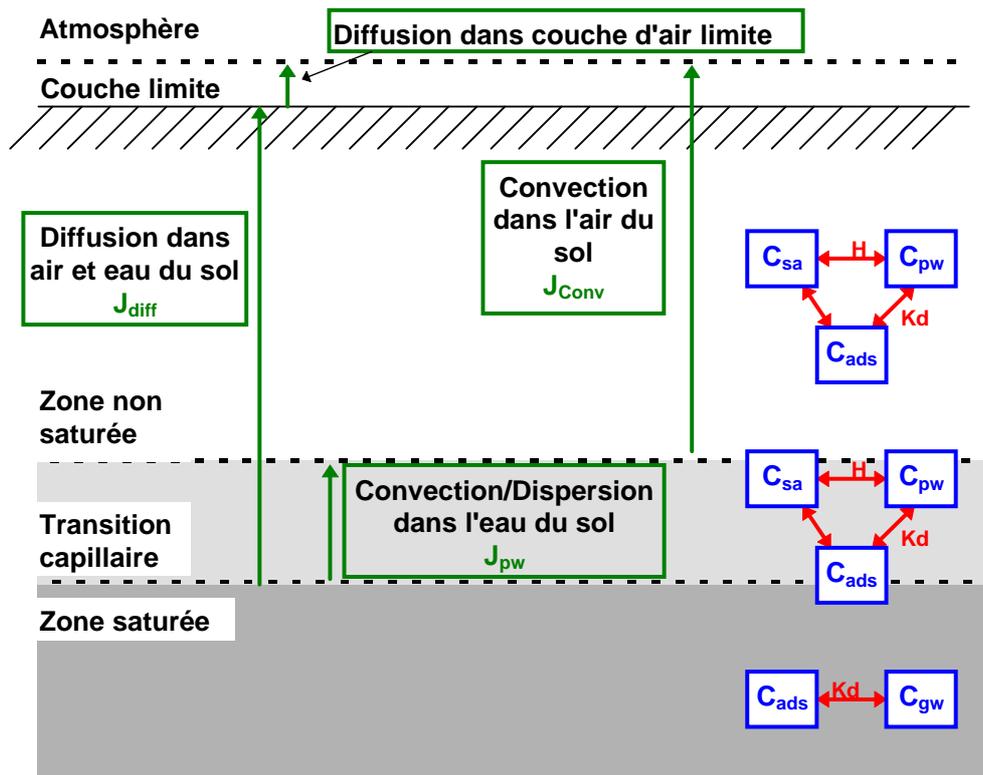
Pour décrire l'émission des substances volatiles dans l'air depuis le sol insaturé, nous reprenons avec quelques aménagements la représentation des milieux de VOLASOIL (cf. Figure 2), en cinq compartiments successifs (dont la zone insaturée et la zone de transition capillaire), avec six mécanismes de transfert. Les aménagements sont signalés dans les sections suivantes.

Les flux de convection et de diffusion dans le sol ne sont pas indépendants ou parallèles : c'est le même air (ou l'eau en équilibre avec cet air) qui est soumis simultanément aux deux phénomènes, et le même flux qui franchit les différentes couches du sol (conservation du flux). Pour intégrer ces interdépendances dans la modélisation, nous modélisons l'émission totale dans l'ordre suivant :

1. modélisation du flux convectif d'air dans le sol (§ 3.2) ;
2. combinaison des flux convectif et diffusif dans la zone insaturée (§ 3.3) ;
3. intégration du flux limite (§ 3.5) ;
4. intégration de la décroissance d'une source finie (§ 3.4).

Nous reprenons ainsi les développements de Hazebrouck (2000) et Hazebrouck *et al.* (2005) (modèle multicouche) et de Hulot *et al.* (2010 : source finie décroissante). Le modèle multicouche a entretemps été intégré au modèle VOLASOIL pour deux couches, le dernier document de présentation de VOLASOIL (Bakker *et al.*, 2008) fournissant en outre par extrapolation la formule développé ici pour un nombre indéfini de couches (Equation 44).

Figure 2: Modélisation générale de l'émission de vapeurs vers l'air atmosphérique



3.2 CONVECTION A TRAVERS LA ZONE INSATUREE

3.2.1 MODELE CONCEPTUEL D'ENSEMBLE

Le modèle VOLASOIL considère qu'une différence de pression entre l'intérieur des bâtiments et le sous-sol entraîne un flux entrant d'air contaminé depuis la source dans la zone insaturée jusque dans le bâtiment, notamment à travers la dalle de fondation.

Deux causes de dépression du bâtiment par rapport au sous-sol sont prévues (Figure 3) :

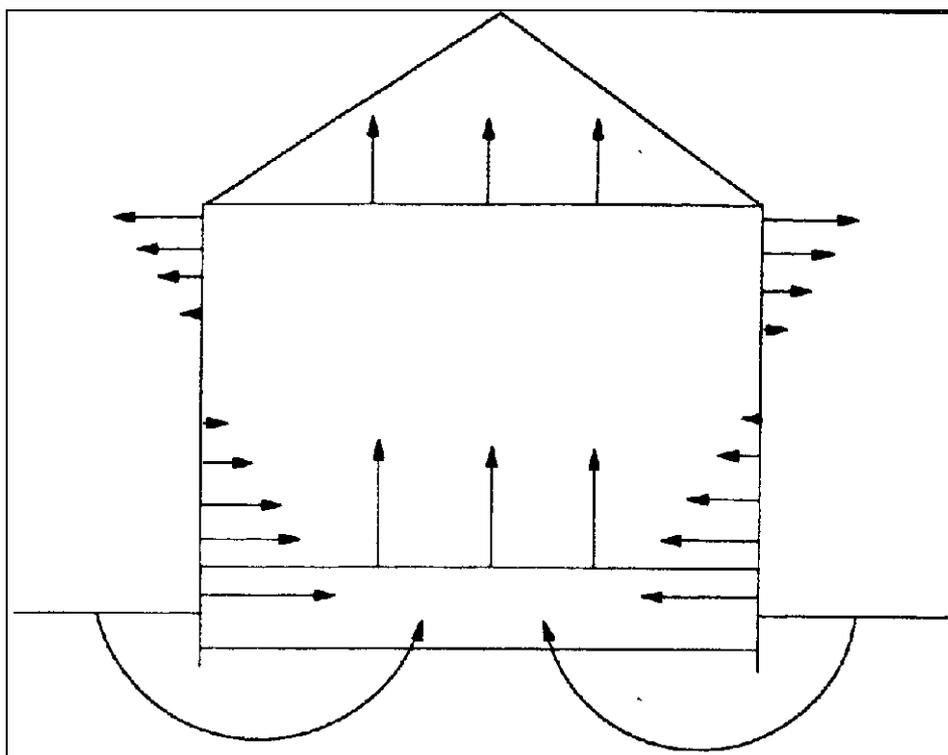
- différence de température due au chauffage ;
- dans une moindre mesure, action des vents sur les murs et mise en pression du sous-sol par l'action des vents face à l'obstacle de la maison.

Le modèle VOLASOIL décompose la dépression en deux parties :

- entre le bâtiment et le vide sanitaire ;
- entre le vide sanitaire et le sous-sol.

En l'absence de vide sanitaire, nous considérerons un unique flux d'air causé par la dépression totale entre le bâtiment et le sous-sol. De façon conservatoire, un éventuel rôle du gravier sous la dalle de fondation des bâtiments, comme zone de mélange, n'est pas pris en compte.

Figure 3: Transport convectif d'air vers l'intérieur d'un bâtiment (Waitz et al, 1996)



3.2.2 PARAMETRES ET EQUATIONS

Paramètre	Symbole	Unité	Valeur
Flux d'air de convection du sol à l'intérieur du bâtiment	F_{ci}	$l/m^2/s$	
Perméabilité à l'air du matériau	K	$m^3/m/Pa/s$	
Perméabilité à l'air moyenne de la dalle et des sols au dessus de la source	K_{tot}	$m^3/m/Pa/s$	
Dépression entre l'intérieur du bâtiment et l'air du sol	Δp_{is}	Pa	
Epaisseur de la couche i	l_i	m	
Profondeur de la source dans la zone insaturée (n couches, dalle comprise)	L_{tot}	m	$L_{tot} = \sum_{i=1}^n L_i$
Fraction surfacique des ouvertures dans la dalle	f_{of}	m^2/m^2	
Densité surfacique des ouvertures dans la dalle	n_{of}	m^{-2}	
Perméabilité intrinsèque du matériau	κ	m^2	
Viscosité dynamique de l'air	η_a	Pa.s	$1,75 \cdot 10^{-5}$
Rayon moyen des ouvertures dans la dalle	r	m	
Fraction surfacique du matériau i	f_i	m^2/m^2	

Le flux d'air F_{ci} [$l/m^2/s$] à travers le sol et la dalle, s'écrit comme dans un aquifère à partir de la loi de Darcy (avec un facteur 1000 pour la différence d'unités):

$$\text{Equation 16} \quad F_{ci} = 1000 K_{tot} \frac{\Delta p_{is}}{L_{tot}}$$

⁵ Valeur à 10°C de l'US EPA, 2004, Annexe C, p 3/8. La valeur donnée avec VOLASOIL (1996 et 2008 p 77), 6.10^{-9} Pa.h, soit $2,16.10^{-5}$ Pa.s, correspond à une température proche de 100°C (voir par ex. les tables proposées dans Wikipedia, "viscosité" et "air").

La perméabilité moyenne de la dalle et du sous-sol, K_{tot} , est la résultante des perméabilités des différents matériaux juxtaposés ou superposés. Comme dans un aquifère, la perméabilité moyenne de deux matériaux juxtaposés dans une même couche (notés i+j), respectivement de deux matériaux superposés en deux couches successives ((notés i+j)), s'écrit comme moyenne arithmétique des perméabilités des matériaux pondérée par les surfaces respectives, respectivement comme moyenne harmonique pondérée par les épaisseurs respectives:

$$\text{Equation 17} \quad K_{i+j} = f_i K_i + f_j K_j, \text{ ou } \frac{L_{tot}}{K_{tot}} = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{K_i}$$

$$\text{Equation 18} \quad (l_i + l_j) / K_{ij} = l_i / K_i + l_j / K_j.$$

Le terme l_i / K_i correspond à la résistance à la convection de la couche i.

Dans VOLASOIL, la perméabilité de porosité (sol, ...) K_p s'obtient de façon classique à partir de la perméabilité intrinsèque par la formule:

$$\text{Equation 19} \quad K_p = \kappa / \eta$$

L'utilisation de cette formule ne tient pas compte de l'occupation d'une partie des pores par de l'eau interstitielle, qui réduit la perméabilité à l'air. Cette approximation est majorante. Le degré de majoration reste à préciser mais est potentiellement important dans la modélisation entreprise (sol sabo-limoneux, avec environ la moitié du volume des pores occupée par l'eau interstitielle).

Pour l'obtention de la perméabilité de fissure (béton, ciment, ...) K_f , VOLASOIL modélise les ouvertures dans les matériaux de la dalle comme des tubes cylindriques verticaux de même rayon r. La loi de mécanique des fluides de Poiseuille aboutit à la formulation:

$$\text{Equation 20} \quad K_f = \frac{f_{of} r^2}{8 \eta} = \frac{f_{of}^2}{8 n \pi \eta}, \text{ où } n \text{ est donné par:}$$

$$\text{Equation 21} \quad n_{of} = \frac{f_{of}}{\pi r^2}.$$

Le choix de tubes verticaux, en réduisant la distance à parcourir au sein du matériau par le flux d'air, est pénalisant. Si les équations de la mécanique des fluides sont bien établies, les incertitudes portent ici sur la modélisation des ouvertures comme des tubes de même rayon r : le flux dans un tube s'écrivant en r^4 , une hétérogénéité des rayons pourrait induire des variations importantes des flux. Dans le cas considéré, une valeur importante étant retenue pour ce rayon r ($r = 4 \text{ mm}$), la modélisation paraît conservatoire.

3.3 DIFFUSION ET CONVECTION DANS LA ZONE INSATUREE

3.3.1 MODELE CONCEPTUEL/ MECANISME

La diffusion résulte du déplacement des molécules seules (sans leur milieu porteur) dans l'air ou l'eau du sol, depuis les concentrations les plus élevées vers les plus faibles.

Pour la décrire, nous partons des équations différentielles locales de diffusion (loi de Fick: Equation 23 et Equation 24) de VOLASOIL. Avant de les intégrer, comme VOLASOIL, nous relient ces équations à l'équation locale de convection, exprimant ainsi la dépendance des deux phénomènes de transfert.

VOLASOIL néglige la diffusion dans l'eau interstitielle et donne une résolution monocouche de l'équation résultante de diffusion+convection dans l'air du sol. Nous présentons ici la résolution intégrée, multicouche et multiphase (y compris la diffusion dans l'eau interstitielle⁶) de ces deux équations.

Les variations temporelles (au sein d'une journée et d'un jour à l'autre) de la pression atmosphérique, et donc de la différence de pression entre l'air du sol et l'air intérieur (mais aussi extérieur), ne sont pas retracées dans la modélisation. Elles occasionnent des périodes de flux plus faibles (voire inverses) et plus importants. La documentation des modèles VOLASOIL et Johnson et Ettinger ne précise pas la valeur retenue couvre ces variations (une valeur moyenne ne serait pas forcément conservatoire). Les variations journalières des paramètres comme la température et l'humidité du sol (en lien avec la pluviométrie) ne sont pas prises en compte dans le modèle : des valeurs "moyennes" sont considérées.

3.3.2 PARAMETRES ET EQUATIONS LOCALES

Paramètre d'entrée	Symbole	Unité
Teneur volumétrique en eau/air dans le sol	Vw/Va	$l_{w/air}/l_{sol}$
Coefficients de diffusion dans l'eau/l'air	Da, Dw	$(mg/m^2/s)/(mg/l/m)$ i.e. $10^{-3} m^2/s$
Coefficient de diffusion moyen de la dalle et des sols au-dessus de la source, rapporté aux concentrations dans l'air du sol	DU _{tot}	
Porosité du matériau	n	-
Masse molaire	M	g/mol

Localement, le flux convectif et les flux diffusifs dans l'eau et l'air interstitiels $[mg/m^2/s]$ s'écrivent respectivement:

Equation 22 $J_{conv} = Fci Csa$

Equation 23 $J_{pw} = Dpw \text{ grad}(Cpw)$

Equation 24 $J_{sa} = Dsa \text{ grad}(Csa)$

avec: Cpw, Csa: concentration dans l'eau interstitielle / dans l'air du sol $[mg/l_{(pw \text{ ou } sa)}]$
Dpw, Dsa: coefficient de diffusion dans l'eau/l'air du sol $[(mg/m^2/s)/(mg/l_{(pw \text{ ou } sa)}/m)]$

⁶ Cette diffusion dans l'eau interstitielle s'avère parfois prédominante, par exemple pour un flux à travers la frange capillaire (source en zone saturée) ou pour des substances peu volatiles et très solubles.

Equation 25 $D_{pw} = V_w^{10/3} D_w / n^2$

Equation 26 $D_{sa} = V_a^{10/3} D_a / n^2$

Dans la formule de D_{sa} , $V_a \times D_a$ rend compte de la simple part de l'espace occupée par le milieu porteur de la diffusion (air): $V_a \times D_a$ correspond à la diffusivité dans des tubes verticaux occupant la part V_a de l'espace.

Le terme multiplicatif $V_a^{7/3} / n^2$ rend compte de la "tortuosité" des milieux (US EPA, 1996), i.e. des détours que doit parcourir le contaminant pour atteindre la surface. La réécriture de ce terme sous la forme $V_a^{1/3} (1 - V_w / n)^2$ traduit la part déterminante attribuée à la présence d'eau interstitielle dans cette tortuosité. Cela explique que d'après Waitz et al (1996), ces formules pourraient ne pas prédire de coefficients de diffusion réalistes dans le cas de sols très secs. D'après l'analyse ci-dessus, ces coefficients seraient alors particulièrement conservatoires. Pour le site considéré, cela pourrait concerner les matériaux de construction (béton, gravier... : $V_w = 0$).

En outre, dans ces formules, toute la porosité du sol est considérée comme utile pour la diffusion des vapeurs, y compris l'éventuelle porosité occluse, qui y participe peu. En conséquence, la modélisation paraît a priori conservatoire.

D'après le RIVM (van den Berg, 1994 et Waitz et al, 1996), et l'US EPA (1996), les essais de diffusion en laboratoire avec des gaz inertes montrent que ces formules correspondent à la meilleure connaissance disponible, avec une bonne adéquation à la réalité. D'après Waitz et al (1996), elles peuvent sous-estimer légèrement les coefficients de diffusion pour des sols à faible teneur en air, ce qui n'est pas le cas des sols considérés ici. En conséquence, nous ne prévoyons pas de facteur de sécurité pour les matériaux de construction.

Le coefficient de diffusion dans l'air D_a de certaines substances (benzène, toluène,..) se trouve dans les tables. A défaut, on calculera D_a à partir de la masse molaire au moyen de la loi de Grahams, qui est reprise dans VOLASOIL:

Equation 27 $D_a = 0,01 (76 / M)^{1/2}, ^7$

Pour le coefficient de diffusion dans l'eau D_w , VOLASOIL donne:

Equation 28 $D_w = 10^{-4} D_a$

En écrivant $C_{pw} = C_{sa} / H$, on obtient l'expression locale du flux de diffusion multiphase, J_{diff}^8 , en fonction d'un seul paramètre de concentration (ici concentration dans l'air interstitiel):

Equation 29 $J_{diff} = J_{pw} + J_{sa} = D U_a \text{ grad}(C_{sa})$, avec:

$D U_a [(mg/m^2/s)/(mg/l_{sa}/m)]$: coefficient de diffusion multiphase rapporté à C_{sa} , donné par:

Equation 30 $D U_a = D_{sw} / H + D_{sa}$,

⁷ Le coefficient de 0,01 correspondant au coefficient 0,036 de VOLASOIL divisé par 3,6 pour passer de m^2/h à $(mg/m^2/s)/(mg/l/m)$.

⁸ Equivalent de J_4 dans VOLASOIL.

Les flux de diffusion et de convection s'ajoutent localement. D'où l'équation locale du flux total:

$$\text{Equation 31} \quad J_{\text{tot}} = J_{\text{diff}} + J_{\text{conv}} = DUa \text{ grad}(Csa) + Fci Csa$$

3.3.3 RESOLUTION MONOCOUCHE

Considérons n couches de sol homogènes (DUa constant) successives, indexées en i croissants depuis la profondeur de contamination (i=0) jusqu'à la surface du sol (couche en contact avec l'air: i=n). La teneur en contaminant dans l'air du sol dans une couche i est notée Csa(z) en fonction de la profondeur z depuis le toit de la couche i.

Sur chaque couche i, les hypothèses de régime permanent et de conservation de la matière se traduisent par la conservation de Jtot avec la profondeur, d'où, en dérivant l'Equation 31 par rapport à z, l'équation différentielle:

$$\text{Equation 32} \quad DUa_i Csa_i''(z) + Fci Csa_i'(z) = 0 \quad ,$$

Cette équation différentielle se résout:

$$\text{Equation 33} \quad Csa_i(z) = - Fci DUa_i K_i e^{-\frac{Fci}{DUa_i}z} + K_i'$$

avec K_i et K'_i deux constantes, déterminées par les conditions aux limites de la couche.

En posant: $\chi_i = e^{-\frac{Fci}{DUa_i}l_i}$, ces conditions aux limites s'écrivent :

$$\text{Equation 34} \quad (Fci DUa_i) K_i = (Csa_i(l_i) - Csa_i(0)) / (1 - \chi_i)$$

$$\text{Equation 35} \quad K_i' = Csa_i(0) + (Fci DUa_i) K_i \quad \text{d'où:}$$

$$\text{Equation 36} \quad K_i' = (Csa_i(l_i) - Csa_i(0) \chi_i) / (1 - \chi_i)$$

Or avec l'Equation 31 (compte tenu de la conservation du flux Jtot) :

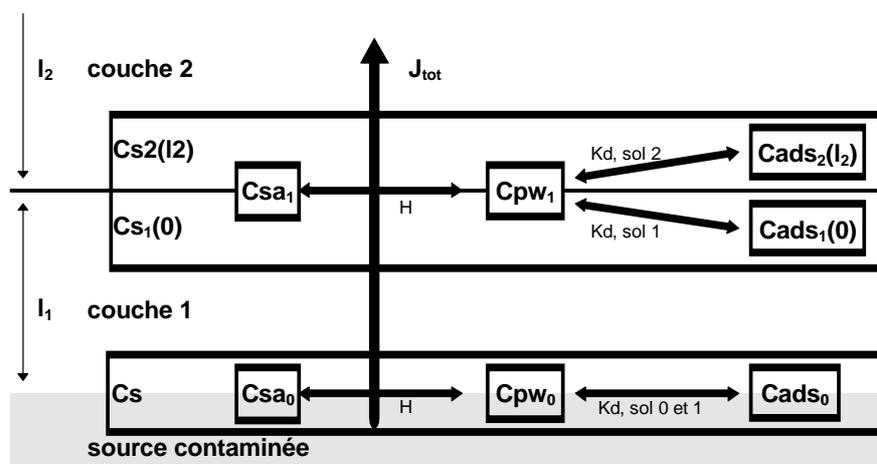
$$\text{Equation 37} \quad J_{\text{tot}} = Fci K_i'$$

D'où finalement, sur chaque couche i :

$$\text{Equation 38} \quad \underline{Csa_i(l_i) = Fci J_{\text{tot}} (1 - \chi_i) + \chi_i Csa_i(0)}$$

3.3.4 RESOLUTION MULTICOUCHE

Figure 4: Modélisation de la diffusion et de la convection dans un sol multicouche



La concentration dans l'air du sol, C_{sa} , est continue. Ce qui permet, à l'intercouche, de noter C_{sa_i} la valeur de C_{sa} au toit de la couche i et au bas de la couche $i+1$ (cf. Figure 4) :

Equation 39 $C_{sa_i} = C_{sa_i}(0) = C_{sa_{i+1}}(l_{i+1})$.

Les hypothèses de régime permanent et de conservation de la matière se traduisent par la conservation de J_{tot} avec la profondeur: pour tout i , $J_{diff} = J_{diff_i}$.

L'Equation 38 se réécrit alors, pour tout i entre 1 et n :

Equation 40 $C_{sa_{i-1}} = 1/F_{ci} J_{tot} (1 - \chi_i) + \chi_i C_{sa_i}$.

D'où par récurrence sur n couches, de la zone de contamination ($C_{sa_0} = C_{sa_{i=0}}$) à la surface ($C_{sa_{surf}} = C_{sa_n}$):

$C_{sa_0} = 1/F_{ci} J_{tot} [(1-\chi_1) + \chi_1 ((1-\chi_2) + \chi_2 ((1-\chi_3) + \chi_3 (... + \chi_{n-2} ((1-\chi_{n-1}) + \chi_{n-1} (1-\chi_n))...)))] + (\prod \chi_i) C_{sa_n}$, soit :

$C_{sa_0} = 1/F_{ci} J_{tot} [1 - (\prod \chi_i)] + (\prod \chi_i) C_{sa_n}$

et enfin, en remplaçant χ_i par son expression:

Equation 41 $J_{tot} = F_{ci} \frac{C_{sa_0} - e^{-F_{ci} \sum \frac{l_i}{DU_{a_i}}} C_{sa_n}}{1 - e^{-F_{ci} \sum \frac{l_i}{DU_{a_i}}}}$.

La concentration C_{sa_n} dans l'air du sol à la surface avec l'atmosphère est faible par rapport à celle de la source sous-jacente: on fait l'hypothèse (*pénalisante*) $C_{sa_n} = 0$.

On définit DU_{tot} [(mg/m²/s)/(mg/l_{sa}/m)] comme le coefficient de diffusion moyen sur l'ensemble des couches rapporté aux concentrations dans l'air du sol :

$$\text{Equation 42} \quad \frac{L_{tot}}{DU_{tot}} = \sum_i \frac{L_i}{DU_{a_i}},$$

Le coefficient de transfert pour l'émission gazeuse par diffusion et convection depuis l'air de la zone contaminée, $CT_{sao \rightarrow ém}$ [(mg/m²/s)/(mg/l)], s'écrit alors :

$$\text{Equation 43} \quad CT_{sao \rightarrow ém} = \frac{F_{ci}}{1 - \exp\left(-F_{ci} \frac{L_{tot}}{DU_{tot}}\right)}, \quad \text{ou encore :}$$

$$\text{Equation 44} \quad J_{tot} = \frac{F_{ci}}{1 - \exp\left(-F_{ci} \frac{L_{tot}}{DU_{tot}}\right)} Csa_o$$

On retrouve la formule monocouche du flux total J_1 de VOLASOIL (Waitz *et al.*, 1996), en remplaçant la résistance à la diffusion moyenne multicouche et multiphase L/DU_{tot} par celle, monocouche et monophasé (L_s/Dsa), de VOLASOIL.

Lorsque le flux d'air F_{ci} tend vers 0, on obtient : $e^{-F_{ci} \frac{L}{DU_{tot}}} \sim 1 - F_{ci} \frac{L}{DU_{tot}}$,

ce qui donne respectivement le coefficient de transfert et le flux pour l'émission gazeuse en extérieur, par diffusion seule (sans convection: $F_{ci} = 0$):

$$\text{Equation 45} \quad CT_{sa \rightarrow ém, diff} = DU_{tot} / L_{tot}$$

$$\text{Equation 46} \quad J_{diff} = DU_{tot} (Csa_o - Csa_n) / L_{tot} \sim DU_{tot} Csa_o / L_{tot}$$

Dans le cas d'une seule couche, on retrouve dans la formule de J_{diff} le flux diffusif $J_{d_{sa}}$ de VOLASOIL (Waitz *et al.*, 1996) ou J_4 de CSOIL (van den Berg, 1994).

De même, en faisant tendre le coefficient de diffusion moyen DU_{tot} vers 0, on retrouve le coefficient de transfert pour l'émission gazeuse par convection, sans diffusion:

$$\text{Equation 47} \quad CT_{sa \rightarrow ém, conv} = F_{ci}.$$

Enfin, en posant $x = F_{ci} L/DU_{tot}$ dans l'Equation 43, on obtient :

$$CT_{sa \rightarrow ém, d+é} - (CT_{sa \rightarrow ém, conv} + CT_{sa \rightarrow ém, diff}) = \frac{x e^{-x} - 1 + e^{-x}}{(1 - e^{-x}) (L/DU_{tot})} = \frac{\frac{x+1}{e^x} - 1}{(1 - e^{-x}) (L/DU_{tot})} :$$

$$\text{Equation 48} \quad CT_{sa \rightarrow ém, d+é} - (CT_{sa \rightarrow ém, conv} + CT_{sa \rightarrow ém, diff}) < 0.$$

Ainsi, le transfert conjugué par les deux modes de transport est inférieur à la somme des deux transferts pris indépendamment.

3.4 ADAPTATION DU MODELE EN SOURCE DECREISSANTE FINIE

Le modèle CSOIL/VOLASOIL ne prend pas en compte l'atténuation de la source. Pour tenir compte de l'épuisement rapide de la source observé dans la modélisation en source permanente⁹ et afin d'estimer un flux plus réaliste, nous présentons et utilisons ici une adaptation de ce modèle qui intègre l'atténuation progressive de la source de contaminants volatils. Cette atténuation est modélisée sous la forme d'un épuisement de la source par le haut, *i.e.* d'une descente progressive du toit de la source au sein de l'épaisseur contaminée.

On se place en régime semi-permanent : les solutions en régime permanent présentées ci-dessus sont reprises à tout instant t donné (approche légèrement conservatoire, car optimisant le transfert).

Dans la modélisation avec source finie décroissante appliquée ici, le toit de la source descend à mesure que la source s'épuise par le haut. Un épuisement total de la couche supérieure de la source est pris en compte pour déterminer le rythme de descente du toit, alors qu'un épuisement partiel serait plus réaliste¹⁰. Le rythme de descente du toit en ressort légèrement sous-estimé, et les flux de vapeurs légèrement sur-estimés.

3.4.1 SOLUTION NUMERIQUE CONSERVATOIRE (CONVECTION ET DIFFUSION)

Nous considérons donc ici une descente progressive du toit de la source au sein de l'épaisseur contaminée, depuis la profondeur L_{tot} à $t=0$, jusqu'à la profondeur $L_{tot}(t) = L_{tot} + z_0(t)$ à l'instant t , où $z_0(t)$ est l'épaisseur épuisée au sein de la zone source.

Le flux F_{ci} d'air du sol depuis le toit de la source vers l'air intérieur, et le coefficient de diffusion multiphase moyen multicouche Du_{tot} , sont maintenant aussi fonction du temps t (ils diminuent avec le temps et la descente de la source).

Le flux de polluant transporté, en mg/m^2 , entre l'instant $t_0=0$ et l'instant t , est :

$$\text{Equation 49} \quad Q_{out}(t) = \int_0^t J_{tot}(y) dy,$$

Par conservation de la masse, ce flux est relié à l'épaisseur épuisée $z_0(t)$ au sein de la zone source :

$$\text{Equation 50} \quad Q_{out}(t) = 10^3 SD C_s [z_0(t) - z_0(t=0)],$$

et la concentration totale C_s dans le sol de la zone source est reliée à la concentration dans l'air du sol de la source C_{sa_0} (Equation 9) :

$$\text{Equation 51} \quad CT_{s \rightarrow sa} = C_{sa_0} / C_s = \frac{H}{Kd + Vw / SD + H Va / SD}.$$

⁹ Du fait de la faible épaisseur et de la forte perméabilité ou diffusivité des couches de couverture prises en compte (dalle béton, enrobé de bitume, terre végétale).

¹⁰ Dans le modèle considéré, le sol au dessus du toit de la source n'est pas exempt de pollution : il présente un continuum de teneurs décroissantes de la source à la surface.

En combinant l'Equation 49 et l'Equation 50, on obtient :

$$\text{Equation 52} \quad 10^3 \text{ SD } C_s z_o'(t) = J_{\text{tot}}(t) = \frac{F_{\text{ci}}(t)}{1 - \exp\left(-F_{\text{ci}}(t) \frac{L_{\text{tot}}(t)}{DU_{\text{tot}}(t)}\right)} Csa_o$$

Avec $L_{\text{tot}}(t) = L_{\text{tot}} + z_o(t)$, $\frac{L_{\text{tot}}(t)}{K_{\text{tot}}(t)} = \frac{L_{\text{tot}}}{K_{\text{tot}}} + \frac{z_o(t)}{K_o}$ et $\frac{L_{\text{tot}}(t)}{DU_{\text{tot}}(t)} = \frac{L_{\text{tot}}}{DU_{\text{tot}}} + \frac{z_o(t)}{DU_o}$, et l'expression de $F_{\text{ci}}(t)$ donnée selon l'Equation 16, l'Equation 52 devient une équation différentielle sans solution analytique (à notre connaissance).

Une solution analytique est accessible en utilisant l'estimation (légèrement sur-conservatoire : cf. Equation 48) du flux total $J_{\text{tot}}(t)$ comme la somme de deux flux de pollution indépendants :

- Le flux dû à la convection seule : $J_{\text{conv}}(t) = Csa_o F_{\text{ci}}(t) = Csa_o 10^3 \Delta P_{\text{is}} \frac{K_{\text{tot}}(t)}{L_{\text{tot}}(t)}$, et
- Le flux dû à la diffusion seule : $J_{\text{diff}}(t) = DU_{\text{tot}}(t) \frac{Csa_o - Csa_n}{L_{\text{tot}}(t)} = DU_{\text{tot}}(t) \frac{Csa_o}{L_{\text{tot}}(t)}$

L'Equation 52 devient alors :

$$\text{Equation 53} \quad 10^3 \text{ SD } C_s z_o'(t) = \frac{Csa_o 10^3 \Delta P_{\text{is}} K_o K_{\text{tot}}}{K_o L_{\text{tot}} + K_{\text{tot}} z_o(t)} + \frac{Csa_o DU_o DU_{\text{tot}}}{DU_o L_{\text{tot}} + DU_{\text{tot}} z_o(t)} \quad \text{ou}$$

$$\text{Equation 54} \quad \frac{CT_{s \rightarrow sa}}{10^3 \text{ SD}} = \frac{a z_o^2(t) + b z_o(t) + c}{d z_o(t) + e} z_o'(t) = \left[\alpha z_o(t) + \beta + \frac{\gamma}{d z_o(t) + e} \right] z_o'(t)$$

avec les définitions suivantes :

$$a = DU_{\text{tot}} K_{\text{tot}} \quad b = L_{\text{tot}} (K_o DU_{\text{tot}} + K_{\text{tot}} DU_o) \quad c = DU_o K_o L_{\text{tot}}^2 \quad d = K_{\text{tot}} DU_{\text{tot}} (10^3 \Delta P_{\text{is}} K_o + DU_o) \\ e = K_o DU_o L_{\text{tot}} (10^3 \Delta P_{\text{is}} K_{\text{tot}} + DU_{\text{tot}}) \quad \alpha = a/d \quad \beta = (b - a e/d)/d \quad \gamma = c - \frac{e}{d} \left(b - \frac{a e}{d} \right)$$

La solution de l'équation différentielle Equation 54 peut s'exprimer ainsi :

$$\text{Equation 55} \quad z_o(t) = G^{-1} \left[G(z_o(t=0)) + \frac{CT_{s \rightarrow sa}}{10^3 \text{ SD}} t \right]$$

lorsque la fonction $G(x)$ est définie comme suit :

$$\text{Equation 56} \quad G(x) = \frac{\alpha}{2} x^2 + \beta x + \frac{\gamma}{d} \ln \left(x + \frac{e}{d} \right).$$

Il n'y a pas de solution analytique pour $z_o(t)$ mais cette solution peut être déterminée numériquement en recherchant une racine de l'équation suivante :

$$\text{Equation 57} \quad G[z_o(t)] - G[z_o(t=0)] - \frac{CT_{s \rightarrow sa}}{10^3 \text{ SD}} t = 0.$$

Avec la solution numérique de $z_o(t)$, le flux moyen de polluant transporté sur la durée t , en $\text{mg/m}^2/\text{s}$, se déduit de l'Equation 50 :

$$\text{Equation 58} \quad \frac{Q_{\text{out}}(t)}{t} = 10^3 \text{ SD } C_s \frac{\min \{ L_o ; z_o(t) - z_o(t=0) \}}{t},$$

où l'épuisement de la source est limitée par l'épaisseur L_o de la couche contaminée : le flux de contrôle de masse global $J_{control}$ [$mg/m^2/s$] sur une durée t donnée, s'écrit :

$$\text{Equation 59} \quad J_{control} = 10^3 SD C_s \frac{L_o}{t}$$

Ou encore, exprimé en Coefficient de transfert de l'air du sol à l'émission :

$$\text{Equation 60} \quad CT_{sa \rightarrow em, control} = \frac{10^3 SD L_o}{CT_{s \rightarrow sa} t}$$

Ce contrôle limite donc la quantité de polluant émise sur la durée t à la quantité présente dans l'épaisseur de la source. Un tel contrôle est proposé pour VOLASOIL par Bakker et al. (2008¹¹) et pratiqué dans des outils commerciaux tels que RISC (Risk Integrated Software for Clean-ups - www.bprisc.com) pour l'émission de vapeurs vers l'air extérieur.

Le ratio entre ce flux moyen de pollution et la concentration Csa_o dans l'air du sol source s'écrit donc :

$$\text{Equation 61} \quad CT_{sao \rightarrow em} = \frac{Q_{out}(t)}{t Csa_o} = \frac{10^3 SD}{CT_{s \rightarrow sa}} \frac{\min\{L_o ; z_o(t) - z_o(t=0)\}}{t}$$

3.4.2 SOLUTION ANALYTIQUE CONSERVATOIRE (CONVECTION ET DIFFUSION)

En l'absence de solution analytique pour les équations de convection et de diffusion ensemble, nous développons ici le modèle CSOIL/VOLASOIL pour une source décroissante finie prenant en compte la convection seule d'une part, la diffusion seule d'autre part, et regroupant les deux solutions analytiques ainsi obtenues. Dans la plupart des cas, pour le transfert vers l'air intérieur, l'un des deux flux dominera nettement, généralement le flux convectif pour les sols sablo-limoneux de perméabilité $4 \cdot 10^{-5}$ m/s ou 10^{-5} m/s modélisés ici.

En prenant en compte la convection seule, l'Equation 49 se simplifie :

$$\text{Equation 62} \quad Q_{out}(t) = \int_0^t J_{tot}(y) dy = \int_0^t J_{conv}(y) dy = \int_0^t Csa_o F_{ci}(y) dy = \int_0^t Csa_o 10^3 \Delta P_{is} \frac{K_{tot}(y)}{L_{tot}(y)} dy$$

Comme l'Equation 50 est toujours valide, l'Equation 53 devient :

$$\text{Equation 63} \quad 10^3 SD C_s z_o'(t) = \frac{Csa_o 10^3 \Delta P_{is} K_o K_{tot}}{K_o L_{tot} + K_{tot} z_o(t)} \quad \text{ou}$$

$$\text{Equation 64} \quad z_o'(t) = \frac{CT_{s \rightarrow sa} \Delta P_{is}}{SD} \frac{K_o}{K_o L_{tot} / K_{tot} + z_o(t)}$$

Cette équation différentielle peut aussi s'écrire :

$$\text{Equation 65} \quad d \left[\frac{K_o L_{tot}}{K_{tot}} + z_o(t) \right]^2 = \frac{2 K_o CT_{s \rightarrow sa} \Delta P_{is}}{SD} dt$$

¹¹ Mais non intégré dans le logiciel VOLASOIL mis à disposition (Lijzen, 2011).

La solution de cette équation est alors :

$$\text{Equation 66} \quad z_o(t) = \sqrt{\frac{2K_o CT_{s \rightarrow sa} \Delta P_{is}}{SD} t + \left(z_o(t=0) + \frac{K_o L_{tot}}{K_{tot}} \right)^2} - \frac{K_o L_{tot}}{K_{tot}}$$

L'Equation 58 et l'Equation 61 sont toujours valides, et la solution analytique de $z_o(t)$ peut y être incluse pour déterminer le flux convectif moyen, en $mg/m^2/s$, sur la durée t .

Si la source de pollution occupe plusieurs couches de sol, cette solution peut être appliquée successivement à chacune de ces couches, et les flux de polluant correspondant moyennés sur la durée totale. Cela requiert le temps d'épuisement de chaque couche, qui s'obtient à partir de l'Equation 66 avec $z_o(t) = L_o$.

Pour le flux de diffusion seule, on repart de l'Equation 62 avec $J_{diff}(y) = C_{sa_o} \frac{DU_{tot}(y)}{L_{tot}(y)}$ au lieu de $J_{conv}(y) = C_{sa_o} 10^3 \Delta P_{is} \frac{K_{tot}(y)}{L_{tot}(y)}$. Le même cheminement aboutit alors à la formule de $z_o(t)$:

$$\text{Equation 67} \quad z_o(t) = \sqrt{\frac{2DUa_o CT_{s \rightarrow sa} 10^{-3}}{SD} t + \left(z_o(t=0) + \frac{DUa_o L_{tot}}{DU_{tot}} \right)^2} - \frac{DUa_o L_{tot}}{DU_{tot}}$$

On vérifie que le flux diffusif moyen depuis une source décroissante, calculé via l'Equation 58 (avec $z_o(t=0) = 0$), est bien inférieur au flux diffusif pour une source permanente (non décroissante) donné par l'Equation 46 :

$$\frac{Q_{out}(t)}{t} = 10^3 SD C_s \frac{z_o(t)}{t} \quad <? \quad J_{diff} = DU_{tot} C_{sa_o} / L_{tot} = DU_{tot} CT_{s \rightarrow sa} C_s / L_{tot}, \text{ soit :}$$

$$\sqrt{\frac{2DUa_o CT_{s \rightarrow sa} 10^{-3}}{SD} t + \left(\frac{DUa_o L_{tot}}{DU_{tot}} \right)^2} \quad <? \quad \frac{DUa_o L_{tot}}{DU_{tot}} + \frac{DU_{tot}}{L_{tot}} \frac{CT_{s \rightarrow sa} 10^{-3}}{SD} t$$

Soit encore, en portant au carré :

$$\frac{2DUa_o CT_{s \rightarrow sa} 10^{-3}}{SD} t + \left(\frac{DUa_o L_{tot}}{DU_{tot}} \right)^2 \quad <? \quad \left(\frac{DUa_o L_{tot}}{DU_{tot}} \right)^2 + 2 \frac{DUa_o CT_{s \rightarrow sa} 10^{-3}}{SD} t + \left(\frac{DU_{tot}}{L_{tot}} \frac{CT_{s \rightarrow sa} 10^{-3}}{SD} t \right)^2$$

Et enfin :

$$0 \quad <? \quad \left(\frac{DU_{tot}}{L_{tot}} \frac{CT_{s \rightarrow sa} 10^{-3}}{SD} t \right)^2 : \text{ l'hypothèse est vérifiée.}$$

On vérifie de la même manière que le flux convectif moyen depuis une source décroissante est bien inférieur au flux convectif pour une source permanente (non décroissante).

L'US EPA (1996, Appendix C), pour l'établissement des *Soil Screening Levels*, a utilisé un modèle d'émission de vapeurs en extérieur avec une source décroissante depuis la surface. Ce modèle part du même modèle de diffusion que CSOIL/VOLASOIL (modèle de Jury). Nous avons vérifié analytiquement¹² et numériquement que le flux exprimé dans ce modèle de l'US EPA est supérieur au flux suivant le modèle CSOIL/VOLASOIL en source finie décroissante développé ici. La différence entre les deux modèles tient à la présence, dans la modélisation CSOIL/VOLASOIL appliquée ici en source finie décroissante, d'une couche de couverture qui réduit la diffusion depuis la source. Nous avons vérifié que cette réduction est très faible dans les configurations de site considérées ici, du fait de la faible résistance à la diffusion des couches de couvertures introduites.

3.4.3 DUREE D'EMISSION t A PRENDRE EN COMPTE

La durée t à prendre en compte est la durée d'exposition pertinente compte-tenu de la durée d'exposition des personnes et du type de Valeur Toxicologique de Référence : pour des effets à seuil, 1 ou 7 ans selon l'organisme ayant établi la VTR¹³ ; pour un effet sans seuil "vie entière", 6 ans pour la période infantile et 64 ans pour une période "adulte" dont l'exposition commence à t=0.

Dans la modélisation effectuée, pour les effets sans seuil "vie entière", la période "adulte" est supposée succéder à la période infantile. Le flux moyen sur la période "adulte" 6-70 ans est alors calculé par moyennation sur 64 ans du flux total émis sur la période 6-70 ans, lui-même obtenu en soustrayant le flux total émis sur t = 6 ans du flux total émis sur t = 70 ans. Cette formule est traduite au niveau des coefficients de transfert :

$$\text{Equation 68} \quad CT_{\text{sa} \rightarrow \text{ém} \text{ 6-70 ans}} = (CT_{\text{sa} \rightarrow \text{ém} \text{ 0-70 ans}} \times 70 - CT_{\text{sa} \rightarrow \text{ém} \text{ 6-64 ans}} \times 6) / 64$$

3.5 FLUX DIFFUSIF LIMITE DANS L'AIR

Nous reprenons le modèle de CSOIL d'une couche limite à la surface du sol, sans mouvement d'air (autre que l'éventuel flux de convection à travers la dalle). Cette couche est caractérisée par son épaisseur et sa diffusivité, qui est la diffusivité dans l'air D_a .

Le flux diffusif maximal J_{lim} [$\text{mg}/\text{m}^2/\text{s}$] à travers cette couche limite, qui limite la diffusion, s'écrit en considérant la concentration dans l'air du sol à la surface égale à la concentration dans l'air du sol de la zone source:

¹² Cette vérification analytique n'est pas présentée ici. La vérification numérique apparaît dans les feuilles de calcul.

¹³ Les VTR chroniques de l'US EPA pour les effets à seuil sont considérées correspondre à une exposition moyennée sur une durée minimale de 7 ans. Dans notre scénario d'exposition avec enfants (ZAC résidentielle), les personnes sont considérées être présentes toute leur vie sur le site. Pour éviter un biais (non conservatoire : sous estimation maximale de 15%), nous avons ignoré la limitation conventionnelle à 6 ans de la durée d'exposition "enfant" pour les effets à seuil, en retenant une durée d'exposition et une durée de moyennation de 7 ans en cas d'utilisation d'une VTR de l'US EPA (cf. justification plus détaillée en Annexe 2).

Equation 69 $J_{lim} = Da C_{sao} / d$, avec:

Paramètre	Symbole	Unité	Valeurs d'entrée
Epaisseur de la couche limite	d	m	0,005*
Coefficient de transfert de l'air du sol au flux limitant	$CT_{sao \rightarrow \text{ém,lim}}$	$(\text{mg}/\text{m}^2/\text{s})/(\text{mg}/\text{l}_{sa})$	

* valeur de Jury et al, 1985, reprise dans VOLASOIL.

Le contrôle de ce flux diffusif limite n'est pas praticable sur un flux global qui mêle diffusion et convection. Aussi ce contrôle est-il ici effectué en amont, en vérifiant que chaque stratigraphie du sol a au moins une couche offrant une résistance à la diffusion L / D_{Ueq} supérieure à celle de la couche limite, d / Da .

4. DISPERSIONS DANS L'AIR ATMOSPHERIQUE

4.1 MODELE CONCEPTUEL GENERAL

Le flux de contaminant émis se disperse dans l'air atmosphérique en intérieur ou en extérieur. Les contributions croisées entre air extérieur (indice o) et air intérieur (indice i) sont modélisées suivant les principes suivants :

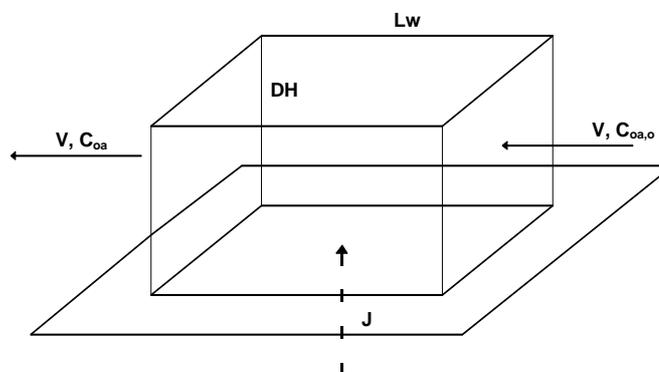
- la contamination de l'air extérieur résulte de la dispersion en extérieur des émissions en intérieur et en extérieur ;
- la contamination de l'air intérieur résulte de la dispersion en intérieur de la contamination de l'air extérieur amont (*via* la ventilation) et des émissions en intérieur (*via* la dalle).

4.2 DISPERSION DANS L'AIR EXTERIEUR

En l'absence de prise en compte de dispersion horizontale, la largeur de la bande aval éolien de chaque source est considérée comme constante.

Le modèle de la boîte a l'avantage de la simplicité et de la transparence. Le flux émis sur la surface d'émission est supposé se répartir immédiatement dans la "boîte" délimitée par cette surface et une "hauteur de dispersion" donnée, et balayée par un vent de vitesse donnée (Figure 5 ci-après).

Figure 5: Modèle de la boîte pour la dispersion dans l'air extérieur



Paramètre	Symbole	Unité
Longueur du site dans le sens du vent	Lw	m
Vitesse du vent dans la zone de dispersion	V	m/s
Hauteur de diffusion, adulte/enfant/rez-de-chaussée	DH _{a/c/RdC}	m
Coefficient de transfert pour la dispersion en extérieur	CT _{ém→oa}	(mg/m ³)/(mg/m ² /s)

Le modèle de la boîte s'écrit, par calcul de flux:

Equation 70 $CT_{ém→oa} = Lw / V / DH_{a/c/RdC}$,

4.3 DISPERSION EN INTERIEUR

Deux provenances de la contamination en intérieur sont prises en compte:

- émission à travers la dalle ;
- air extérieur introduit par la ventilation, conduisant à une concentration respirée dans l'air intérieur égale à la concentration dispersée dans l'air extérieur sur une hauteur égale à celle du rez-de-chaussée.

Pour la dispersion du flux émis à travers la dalle dans la pièce, nous reprenons le modèle *commun à tous les modèles* (dont VOLASOIL 1996 et 2008) de dispersion dans un volume de dispersion donné (pièce du bâtiment), renouvelé à un rythme donné, en négligeant le flux d'air à travers la dalle devant le flux d'air de ventilation (très légèrement conservatoire) :

Equation 71 $CT_{ém_i→ia} = 1 / (Hvd Rv)$, avec:

Paramètre	Symbole	Unité
Hauteur de la pièce	Hvd	m
Taux de ventilation de la pièce	Rv	s ⁻¹
Coefficient de transfert pour la dispersion en intérieur	CT _{ém_i→ia}	(mg/m ³ _{nda})/(mg/m ² /s)

5. EXPOSITION DES PERSONNES A L'AIR ATMOSPHERIQUE ET EXPRESSION DES NIVEAUX DE RISQUE

Les coefficients de transfert précédents aboutissent à une concentration dans l'atmosphère Ca [mg/m³] respirée par l'homme en un lieu donné.

Pour chaque substance et voie d'exposition, le niveau de risque est alors quantifié à partir de la fréquence d'exposition et de la Valeur Toxicologique de Référence (VTR), sous la forme de quotient de danger (QD) pour les effets à seuil et d'excès de risque individuel (ERI) pour les effets sans seuil, selon les expressions :

- $QD = \frac{\text{exposition reçue moyenne}}{\text{valeur toxicologique de référence}}$;
- $ERI = (\text{exposition reçue moyenne}) \times (\text{valeur toxicologique de référence})$.

La VTR est (cf. Annexe 3) :

- Pour les effets à seuil, une concentration tolérable dans l'air ou concentration de référence, RfC [mg/m^3]
- Pour les effets sans seuil, un excès de risque unitaire par inhalation, ERUi [$(\text{mg}/\text{m}^3)^{-1}$].

Lorsque le quotient de danger est inférieur à 1, la survenue d'un effet toxique est considérée comme exclue, même pour les populations sensibles, au regard des connaissances scientifiques disponibles. Au-delà de 1, la possibilité d'apparition d'un effet toxique ne peut plus être exclue. Cette possibilité apparaît d'une manière générale d'autant plus forte que le QD augmente. Mais ce degré de vraisemblance n'est pas linéaire par rapport à le QD. En effet, les concentrations tolérables des effets à seuil ne sont pas toutes définies avec le même degré de précision et sont basées sur des effets toxiques plus ou moins significatifs.

Pour les effets cancérigènes sans seuil, l'excès de risque individuel par la voie inhalation est la probabilité supplémentaire, par rapport à un sujet non exposé, qu'un individu a de développer l'effet s'il est exposé par la voie inhalation à la concentration moyenne de la substance (généralement) sur sa vie entière.

Le "coefficient de transfert"¹⁴ de l'air atmosphérique au niveau de risque pour l'homme (enfant et adulte séparément¹⁵) s'écrit alors :

Equation 72 $CT_{a \rightarrow QD} = FEM / 24 / RfC$, pour les effets à seuil $[(QD)/(\text{mg}/\text{m}_a^3)]$,

Equation 73 $CT_{a \rightarrow ERI} = FEM ERUi / 24$, pour les effets sans seuil $[(ERI)/(\text{mg}/\text{m}_a^3)]$,

avec:

Paramètre	Symbole	Unité
Concentration de référence, inhalation	RfC	mg/m^3
Excès de risque unitaire par inhalation	ERUi	$(\text{mg}/\text{m}^3)^{-1}$
Fréquence d'exposition moyenne à l'air considéré sur la période considérée, adulte/enfant	FEM	h/j
Durée d'exposition, adulte/enfant	DEa/c	ans

Pour les effets chroniques à seuil, la fréquence d'exposition à l'air est moyennée sur 1 ou 7 ans suivant l'organisme ayant établi la VTR (cf. note 13 p 21).

Pour les effets sans seuil avec une VTR s'exerçant sur une vie entière, la fréquence d'exposition à l'air est moyennée sur 70 ans (et notée FEMcanc) :

Equation 74 $FEMcanc \text{ a/c} = FMEc \text{ DEa/c} / 70$.

¹⁴ Ce terme de "coefficient de transfert" est ici utilisé de manière abusive puisqu'il s'agit plutôt d'un "passage" de concentrations d'exposition à une exposition et à un risque, plutôt que d'un "transfert". Il est utilisé par commodité (continuité des notations).

¹⁵ Car le facteur de transfert précédent, pour la dispersion dans l'air atmosphérique, et donc la concentration dans l'air atmosphérique, peut varier entre adulte et enfant (en l'occurrence pour l'air extérieur, du fait de la hauteur de respiration différente).

6. BILAN, CALCUL DE LA TENEUR LIMITE DANS LES SOLS

Les "coefficients de transfert" du sol source aux niveaux de risques (à seuil $CT_{s \rightarrow QD}$ et sans seuil, $CT_{s \rightarrow ERI}$) s'obtiennent par :

1. multiplication des Coefficients de Transfert successifs le long d'un chemin de transfert, enfant et adulte séparés.
2. agrégation des coefficients enfant et adulte ainsi obtenus
 - pour les effets sans seuil : addition des deux coefficients, correspondant ici à l'hypothèse de présence successive de la même personne sur les périodes enfant et adulte respectivement ;
 - pour les effets à seuil : sélection du maximum des deux coefficients.

Les concentrations limites dans les terres excavées au regard du risque sanitaire sont obtenues par :

1. calculs inverses à partir des niveaux de risque retenus, ERI_{lim} et des "coefficients de transfert" du sol source aux niveaux de risques (effets à seuil et sans seuil) ;
2. sélection du minimum des deux concentrations limites obtenues pour les effets à seuil et sans seuil respectivement ;

Equation 75 $Cs_{lim} = \min (ERI_{lim} / CT_{s \rightarrow ERI} ; QD_{lim} / CT_{s \rightarrow QD})$

3. test vis-à-vis de la concentration dans le sol correspondant à la saturation de l'équilibre multiphase, Cs_{sat} :
 - maintien de la teneur limite calculée Cs_{lim} si $Cs_{lim} \leq Cs_{sat}$;
 - « Pas de Valeur Limite » (PVL) si $Cs_{lim} > Cs_{sat}$: le niveau de risque ne peut être atteint pour la substance, quelle que soit sa concentration dans le sol source.

Annexe 2 : Caractéristiques des voies de transfert

ANNEXE 2 : Caractéristiques des voies de transfert

SOMMAIRE

1. OBJET DE L'ANNEXE	2
2. CARACTERISTIQUES DES SOLS ET MATERIAUX	2
3. CONDITIONS DE VENTILATION ET DE PRESSION, ET DE FREQUENTATION DES LIEUX	9

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques retenues pour les sols et matériaux.....	3
Tableau 2 : Stratigraphie d'un revêtement de parking.....	4
Tableau 3 : Commentaires de la paramétrisation des sols et couvertures	6
Tableau 4 : Sensibilité des concentrations limites calculées vis-à-vis de la foc et de la perméabilité du sol source.....	8
Tableau 5 : Conditions de ventilation des bâtiments et de fréquentation des différents lieux	10
Tableau 6 : Conditions de dispersion des vapeurs en extérieur	10

1. OBJET DE L'ANNEXE

La modélisation comprend le choix de données d'entrée pour les propriétés physico-chimiques des substances.

Cette annexe présente ces données, les choix associés, et leurs justifications.

2. CARACTERISTIQUES DES SOLS ET MATERIAUX

Les caractéristiques des sols et couvertures ont été retenues en concertation avec le GT « terres excavés ». Elles sont présentées dans le Tableau 1 ci-après.

Pour assurer une large applicabilité des valeurs seuils proposées, la logique a été de retenir des caractéristiques réalistes conservatoires :

La stratigraphie au dessus de la zone source est définie comme suit :

- Stratigraphie sous bâtiment au dessus des terres excavées :
 - 15 cm de gravier (sans impact sur la diffusion ou la convection, car très perméable et diffusif vis-à-vis des vapeurs),
 - 15 cm de dalle de « qualité normale » au sens de VOLASOIL (Waitz *et al.*, 1996) ;
- Stratigraphie hors emprise des bâtiments au dessus des terres excavées :
 - 30 cm de terre végétale de pelouse standard (limon sableux), ou
 - 4 cm d'enrobé bitumineux sur 40 cm de gravier sec ;
- Fraction de carbone organique (foc) du sol source (terres excavées) relativement faible, favorisant la libération sous forme dissoute ou vapeur, et correspondant à un sol relativement profond (sous la terre végétale) : en l'absence de données pour la zone non saturée du sol, il s'agit d'une borne haute de foc mesurées dans des aquifères alluvionnaires¹ rapportées par Spitz et Morenno, 1996.
- Terres sous bâtiments (terres excavées) relativement perméables (à l'eau comme aux vapeurs) dans la limite de terres couramment réutilisées pour un tel usage (caractéristiques géotechniques et occurrence) : le choix s'est porté sur un sol sablo-limoneux de perméabilité à l'eau de 4.10^{-5} m/s.

¹ Principalement glacio-fluviaux, voire lacustres, avec une gamme de 0,02% à 0,1%, hormis un foc de 0,5%, pour un « sédiment de rivière ».

Couche	Matériau	Paramètre Unité	foc %kgOC/kgms	n lvide/lisol	SD kgms/l	Vw lpw/lisol	Va lsa/lisol	Source des données entrées	Perméabilité de porosité				li m	
									k m/s	Kmax m3 /m	K m3 /m	Source des données entrées		K m3/m/Pa/s
Couche limite	Air		NC	1	NC	0	1	CSOIL; VOLASOIL 1996, 2008						0,005
Sous dalle	Gravier (sec)		NC	0,2	NC	0	0,2	HESP, avec Vw = 0 au lieu de 0,01	0,01	1,3E-09	1,3E-09	de Marsily, 1981	7,6E-5	0,15
Enrobé parking	Bitume parking		NC	0,03	NC	0	0,03	USIRF, 2011: porosité efficace 0-3% pour porosité totale 5-8%	NC	NC	NC		NC	0,04
Sous enrobé	Gravier (sec)		NC	0,2	NC	0	0,2	HESP, avec Vw = 0 au lieu de 0,01	NC	NC	NC		NC	0,4
TV pelouse	Limon sableux pelouse		NC	0,4	NC	0,18	0,22	"Standard soil" HESP un peu + sec	NC	NC	NC		NC	0,3
Terres excavées	Sable limoneux		0,1	0,4	1,5	0,2	0,2	CSOIL; HESP "standard soil" (Volasoil 2008: n=0,45, Vw=0,25)	4E-05	5,3E-12	5,3E-12	Choix du GT	3,0E-7	3
									Perméabilité de fissure (VOLASOIL)					
									r m	fof m2/ m2	nof m-2	Source des données entrées	K m3/m/Pa/s	
Dalle	Béton sec qualité normale		NC	0,02	NC	0	0,02	HESP (1995 p 31; ECETOC n°40), avec Vw = 0 au lieu de 0,01	4,0E-3	1,0E-5	2,0E-1	VOLASOIL	1,1E-6	0,15

avec :

Paramètre	Symbole	Unité	Paramètre	Symbole	Unité	Valeur
Teneur en carbone organique (OC) dans le sol	foc	%kgOC/kgms	Conductivité à l'air	K	m3/m/Pa/s	
Porosité	n	lvide/lisol	Rayon moyen des ouvertures dans la dalle	r	m	
Densité du sol sec en place	SD	kgms/l	Fraction surfacique des ouvertures de la dalle	fof	m2/ m2	
Fraction volumique d'eau dans le sol	Vw	lpw/lisol	Densité surfacique des ouvertures de la dalle	nof	m-2	
Fraction volumique d'air dans le sol	Va	lsa/lisol	Viscosité dynamique de l'air	nua	Pa.s	1,8E-5
Conductivité hydraulique du sol	k	m/s	Epaisseur de la couche i (au dessus de la source)	li	m	
Perméabilité intrinsèque du sol	K	m3 /m				

Tableau 1 : Caractéristiques retenues pour les sols et matériaux

Les autres données d'entrée des sols ont été fixées sur la base des valeurs proposées dans les documentations des modèles HESP (Shell, 1995), Johnson et Ettinger, VOLASOIL (1996 et 2008) et d'autres ouvrages de référence en la matière (de Marsily, 1981), ainsi que, pour la couverture d'enrobé bitumineux, d'une description par l'USIRF (2011) des gammes de caractéristiques de ce matériau (cf. Tableau 2 ci-après).

Couches selon USIRF	Description USIRF	Prise en compte dans la modélisation
Enrobé	La teneur en vides absolue des enrobés de surface varie en général de 5 à 8%. Pour une teneur en vides absolue de 5%, la teneur en vides communicants est nulle. En conséquence, la porosité au sens de la modélisation pourrait être de 0 à 3% au plus. Pour un parking pour véhicules, légers, l'épaisseur d'enrobé est de 4-5 cm.	Porosité efficace 3 % (sèche) (conservatoire réaliste) Epaisseur 4 cm (conservatoire réaliste)
Couche d'accrochage	Emulsion bitumineuse Appliquée en surface de la couche d'assise avant application de l'enrobé. Forme un film continu.	Non prise en compte (conservatoire, pour le cas de discontinuités)
Assise	Soit 40 à 50 cm de grave non traitée Soit sol fin traité au liant hydraulique, éventuellement préalablement à la chaux ² , de 30 à 35 cm d'épaisseur.	40 cm de gravier (sec) (conservatoire réaliste)

Tableau 2 : Stratigraphie d'un revêtement de parking

Des perméabilités intrinsèques maximales κ_{\max} [m²] des matériaux poreux sont dans un premier temps calculées à partir des perméabilités à l'eau (hydraulique) k [m/s], au moyen de la relation (de Marsily, 1981):

Equation 1 $\kappa_{\max} = k \frac{\eta_w}{\rho_w g} = 1,3 \cdot 10^{-7} k$, avec:

Paramètre d'entrée	Symbole	Unité	Valeur (de Marsily, 1981 ; à 10°C)
Viscosité dynamique de l'eau	η_w	kg/m/s	$1,307 \cdot 10^{-3}$
Masse volumique de l'eau	ρ_w	kg/m ³	999,7
Accélération de la pesanteur	g	m/s ²	9,806655

Ces perméabilités intrinsèques maximales sont ensuite confrontées aux gammes de valeurs proposées dans les modèles VOLASOIL et Johnson et Ettinger. Une valeur est alors retenue, ici de façon conservatoire κ_{\max} .

Ces choix sont commentés dans le Tableau 3 ci-après.

² Traitement à proscrire *a priori* en cas de présence de cyanure dans les terres apportées sous-jacentes (risque de dégagement d'acide cyanhydrique HCN).

Commentaire	Impact
<p>Pour le transport convectif, la perméabilité à l'air du sol est fixée à partir de sa perméabilité à l'eau, par application du rapport des viscosités entre l'air et l'eau. Cela revient à considérer un sol saturé en air. Cette approximation est majorante : en réalité, l'eau interstitielle, en occupant une partie des pores du sol, réduit la perméabilité à l'air.</p> <p>Le degré de majoration de la perméabilité est potentiellement important, avec un sable limoneux dont la moitié du volume poral est occupée par l'eau interstitielle (Vw). Toutefois, cette valeur de Vw correspond à un sol à la capacité au champ (Shell, 1995), et non à un sol sous bâtiment, vraisemblablement plus sec³.</p> <p>De fait, la perméabilité à l'air calculée pour le sol source ($5,3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$) se situe un facteur 5 au dessus de la borne haute de la gamme proposée par l'US EPA (2003 : $10^{-13} - 10^{-12} \text{ m}^2$) pour un sable limoneux, et un facteur 11 au dessus de la valeur proposée par VOLASOIL (1996, 2008, $3,2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$, toutefois à la capacité au champ, et non pour un sol plus sec).</p>	<p>Conservatoire.</p> <p>Potentiellement important en général pour un sol sablo-limoneux, mais limité ici</p> <p>(cf. discussion de l'influence de la perméabilité du sol source, ci-dessous).</p>
<p>Toute la porosité du sol occupée par l'air est considérée comme participant à la diffusion des vapeurs, y compris l'éventuelle porosité occluse, qui n'y participe pas.</p>	<p>Conservatoire.</p> <p>Plutôt faible ici (sols granulaires)</p>
<p>Pour la porosité connectée de la dalle, la valeur de 0,2% donnée par HESP et reprise d'ECETOC (1990), paraît plus réaliste que la valeur de 0,0001% qui ressort de la paramétrisation de la perméabilité d'une dalle de qualité « normale » par VOLASOIL (1996).</p>	<p>Conservatoire.</p> <p>Impact quasi-nul, la convection à travers la dalle étant dominante.</p>
<p>Pour la couche de surface, on a retenu un sol sablo-limoneux légèrement desséché (10% d'eau en moins par rapport au sol « standard » selon HESP et au sol de référence de CSOIL et VOLASOIL-1996⁴ : $V_w=0,18$ au lieu de 0,20 sur une porosité totale n de 0,4). Un sol plus sec serait sans doute réaliste. Le taux d'humidité du sol de couverture n'influe pas sur les concentrations limites calculées pour les substances les plus volatiles (épuisement complet de la source) et les plus lourdes ("Pas de valeur Limite"), mais fortement sur les substances intermédiaires et surtout polaires, suivant une relation croissante au risque estimé pour le phénol et les hydrocarbures agrégés C10-C40 (polaires : seuil diminué de près de 25% pour une hausse de 10% de Vw), et décroissante pour le naphthalène (seuil augmenté de 10%). Le degré d'humidité du sol retenu est un compromis, il serait envisageable de retenir une valeur seuil correspondant à la plus pénalisante entre deux situations de sols plus ou moins humides.</p>	<p>Conservatoire ou non selon les substances.</p>

³ Par ailleurs, la modélisation de la diffusion dans l'air du sol vers l'air intérieur peut se trouver sous-estimée avec cette valeur de Vw sur-estimée, sans conséquence toutefois car la diffusion dans l'air du sol reste mineure par rapport à la convection vers l'air intérieur.

⁴ Davantage par rapport au "sable fin" et au "sable limoneux" de VOLASOIL-2008 : $n=0,45$, $V_w=0,25$, $V_a=0,2$; à porosité occupée par l'air (V_a) inchangée, l'accroissement de la porosité occupée par l'eau (V_w) se traduit par une diminution de la diffusivité.

Commentaire	Impact
<p>Dans la stratigraphie d'une couche de parking, on a retenu les bornes inférieures des gammes d'épaisseurs fournies par l'USIRF pour les couches de gravier et de bitume. L'épaisseur de gravier a une influence mineure par rapport à celle du bitume ; l'épaisseur de bitume influence peu les résultats ici pour les substances volatiles (du fait de l'épuisement -même partiel- de la source avec différentes épaisseurs), et les influence de façon linéaire pour les substances les moins volatiles (ex. phénol, avec une faible descente du toit de la source).</p>	<p>Conservatoire, impact nul pour les volatils, limité pour les moins volatils (gamme initiale restreinte)</p>
<p>L'épaisseur de dalle de 15 cm retenue ici est moins conservatoire que l'épaisseur de 10 cm retenue par VOLASOIL (1996 et 2008) et signalée comme épaisseur minimale par Rincent (1995). Elle correspond à la valeur par défaut de l'US EPA (2003), « cohérente avec la valeur proposée par Johnson et Ettinger (1991) ». Elle est retenue ici en tant que valeur considérée comme minimale pour une dalle de fondation. La valeur de VOLASOIL se référait initialement (Waitz <i>et al.</i>, 2008) à une dalle en béton sur vide sanitaire.</p>	<p>Moins conservatoire que VOLASOIL. Choix supposé réaliste.</p>
<p>La modélisation de la perméabilité de la dalle dans VOLASOIL, conceptuellement conservatoire, repose sur une paramétrisation peu documentée : fraction surfacique des fissures dans la dalle, rayon de tubes équivalents considérés. Cette paramétrisation n'étant pas accessible à la mesure directe, aucune amélioration de la précision de cette paramétrisation ne peut être proposée dans le cadre de cette étude : la validité de cet aspect de la modélisation est limitée par l'état actuel de la connaissance disponible. Ici, la paramétrisation introduite dans VOLASOIL pour une dalle de « qualité normale » a été utilisée.</p>	<p>Incertain. Potentiellement important. Mais faible à nul pour les substances volatiles et très peu volatiles⁵.</p>

Tableau 3 : Commentaires de la paramétrisation des sols et couvertures

Influence de la fraction de carbone organique (foc) et de la perméabilité du sol source

Dans les modèles en source décroissante, le coefficient de transfert du sol vers l'air du sol et la perméabilité du sol n'interviennent pas linéairement dans l'expression du risque, contrairement aux modélisations en régime permanent, mais sub-linéairement. En effet, une augmentation du transfert de pollution sous forme de vapeurs qui serait générée par des variations de ces paramètres, serait en partie compensée par une descente plus rapide du toit de la source, qui intervient de façon limitante sur le transfert.

⁵ Epuisement de la source pour les substances très volatiles (jusqu'aux xylènes inclus), « Pas de Valeur Limite » pour les substances très peu volatiles, avec un béton de « bonne qualité » selon VOLASOIL (perméabilité à l'air divisée par 100). Augmentation maximale de la concentration limite calculée d'un facteur 5 pour les coupes Ar EC8-EC10. Avec les perméabilités retenues, la dalle offre la même résistance à la convection que 5 cm de terres excavées environ. Elle n'est donc déterminante dans la perméabilité moyenne des matériaux (dalle + sol), que pour les substances peu volatiles, qui pour la plupart ne présentent pas de valeur limite en scénario « bâtiment ». Pour les substances très volatiles, la source s'épuise rapidement, et s'épuiserait également dans le temps d'exposition considéré avec une perméabilité moindre.

En outre, dans la modélisation en source finie (restreinte à une épaisseur de sol donnée), le contrôle de masse global écrête la quantité totale de polluant transférée sur la période d'exposition à prendre en compte, et donc le flux moyen sur cette période. A partir d'un certain niveau de flux, cet écrêtage supprime la sensibilité des teneurs limites calculées vis-à-vis des paramètres de transfert.

Inversement, l'écrêtage des teneurs limites calculées par le contrôle de la saturation de l'équilibre multiphase supprime cette sensibilité en deçà d'un certain niveau de flux (« pas de valeur limite »).

Enfin, dans la modélisation de l'équilibre multiphase, la fraction de carbone organique du sol source (foc) intervient quasi-linéairement sur le coefficient de transfert du sol vers l'air du sol uniquement pour les polluants se trouvant principalement sous forme adsorbée. La relation devient fortement sub-linéaire pour des substances comme le chlorure de vinyle, le phénol, la coupe Al EC5-EC6, voire le TCE, le PCE, le benzène, le toluène, qui présentent une affinité limitée envers la matrice solide du sol⁶.

Une étude de sensibilité a été réalisée sur ces deux paramètres, vis-à-vis de deux valeurs moins pénalisantes (mais encore relativement prudentes) de la foc et de la perméabilité du sol. Elle est présentée sur un choix de substances dans le Tableau 4, avec le report de l'épaisseur de source épuisée calculée dans chaque simulation. Il en ressort que la sensibilité des teneurs limites calculées dans les sols vis-à-vis de ces paramètres dans les gammes et la configuration du site considérées (notamment épaisseur de source de 3 m), est :

- quasi-nulle pour les substances volatiles (jusqu'aux xylènes et Al EC10) sous bâtiment, et très volatiles (jusqu'au DCE⁷) en extérieur : la source est totalement épuisée dans les 3 configurations sur la durée d'exposition ;
- quasi-nulle pour les substances lourdes (HCT>EC16 dont BaP,...) sous bâtiment et les substances peu volatiles (Ar > EC12 et Al > EC10) ou peu toxiques (Al EC5-EC8) en extérieur : le contrôle de la saturation au niveau du sol source écrête les teneurs limites ;
- sub-linéaire dans les cas intermédiaires, avec un impact maximum d'un facteur 2 pour la perméabilité divisée par 4, et 3 pour la foc multipliée par 6 (naphtalène dans les deux cas), mais aussi le passage en « valeur limite » plutôt que « pas de valeur limite » (PVL) dans quelques cas.

⁶ Coefficient de partage carbone organique eau, Koc, de 7,9 l/kg, 12 l/kg, 794 l/kg, 60 à 200 l/kg respectivement, et coefficient de Henry de 1,1 et de 36 pour le chlorure de vinyle et Al EC5-EC6 respectivement. Dans la configuration de sol source retenue pour la modélisation, le transfert de l'air du sol est multiplié seulement par 1,1, 1,4, 2,5 à 3,8 lorsqu'on divise foc par 6.

⁷ Voir TCE pour une période d'exposition plus longue (effet sans seuil déterminant).

	Paramètre	Unité	CV	TCE	PCE	B	X	AI EC5-EC6	AI >EC6- EC8	AI >EC8- EC10	AI > EC10- EC12	AI >EC12- EC16	AI >EC16- EC21	N	Ace	Bap	Phénol
	Durée t considérée ici pour l'épaisseur de an source volatilisée (effet à seuil)		1	1	1	1	7	1	1	1	1	1	1	7	1	1	1
	Rapport des CT du sol à l'eau interstitielle, - foc=0.1 / foc = 0.6		1,1	2,9	3,6	2,4	5,0	1,7	2,8	4,7	5,7	5,9	6,0	5,3	5,7	6,0	1,4
Sous bâtiment BUREAUX																	
k foc 0,1	Teneur limite (effet à seuil) *	mg/kg ms	2,9E-1	1,0E+0	1,8E-1	5,0E-2	3,6E+0	9,5E+1	9,5E+1	5,2E+0	5,2E+0	6,6E+0	PVL	2,6E-1	PVL	PVL	8,2E+0
	Teneur limite (effet sans seuil) *	mg/kg ms	1,8E+0	9,0E-1	3,1E-1	3,0E-1	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	5,5E-2	2,6E+0	5,7E+0	PVL
	Epaisseur de source volatilisée à t, avant contrôle de masse global	m	20	11	12	8,8	12	23	19	12	5,3	2,3	0,6	1,2	0,28	2,2E-5	0,04
	Teneur limite	mg/kg ms	2,9E-1	9,0E-1	1,8E-1	5,0E-2	3,6E+0	9,5E+1	PVL	5,2E+0	5,2E+0	PVL	PVL	5,5E-2	2,6E+0	PVL	8,2E+0
k foc 0,1	Epaisseur de source volatilisée à t, avant contrôle de masse global	m	13	7	7	5,5	8	14	11	6,7	2,9	1,3	0,3	0,7	0,15	2,2E-5	0,03
	Teneur limite	mg/kg ms	2,9E-1	9,0E-1	1,8E-1	5,0E-2	3,6E+0	9,5E+1	PVL	5,2E+0	5,3E+0	PVL	PVL	1,1E-1	5,1E+0	PVL	1,2E+1
k foc 0,6	Epaisseur de source volatilisée à t, avant contrôle de masse global	m	19	6,4	5,9	5,5	5,0	17	11	5,0	2,1	0,9	0,2	0,5	0,10	3,6E-6	0,03
	Teneur limite	mg/kg ms	2,9E-1	9,0E-1	1,8E-1	5,0E-2	3,6E+0	9,5E+1	9,5E+1	5,2E+0	7,5E+0	1,7E+1	PVL	1,3E-1	6,3E+0	PVL	1,1E+1
Zone récréative + habitations (ZAC), terres en ext. sous couverture terre végétale (30 cm)																	
foc 0,1	Teneur limite (effet à seuil) *	mg/kg ms	1,6E+0	5,6E+0	9,8E-1	2,9E-1	2,0E+1	5,2E+2	5,2E+2	3,5E+1	8,9E+1	2,7E+2	PVL	9,8E+0	PVL	PVL	1,6E+2
	Teneur limite (effet sans seuil) *	mg/kg ms	9,8E+0	4,9E+0	1,7E+0	1,6E+0	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	1,7E+0	1,0E+2	4,0E+2	PVL
	Epaisseur de source volatilisée à t, avant contrôle de masse global	m	6,9	3,5	3,5	2,7	3,5	5,8	4,4	2,4	0,9	0,3	0,03	0,2	0,0	1,8E-6	0,01
	Teneur limite	mg/kg ms	1,6E+0	4,9E+0	9,8E-1	2,9E-1	2,0E+1	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	1,7E+0	PVL	PVL	1,6E+2
foc 0,6	Epaisseur de source volatilisée à t, avant contrôle de masse global	m	6,4	2,0	1,8	1,7	1,5	4,3	2,5	1,0	0,3	0,1	0,01	0,0	0,0	3,0E-7	0,01
	Teneur limite	mg/kg ms	1,6E+0	4,9E+0	1,7E+0	4,7E-1	4,0E+1	PVL	PVL	8,4E+1	PVL	PVL	PVL	5,4E+0	PVL	PVL	2,2E+2

PVL: Pas de Valeur Limite

* Teneur limite (effet à seuil /sans seuil): avant contrôle de la saturation

Tableau 4 : Sensibilité des concentrations limites calculées vis-à-vis de la foc et de la perméabilité du sol source

3. CONDITIONS DE VENTILATION ET DE PRESSION, ET DE FREQUENTATION DES LIEUX

Nous reprenons la différence de pression ΔP de VOLASOIL (1996, 2008) entre l'air du sol et l'intérieur du bâtiment (4 Pa), également retenue par l'US EPA (2003) comme valeur conservatoire par défaut. Dans VOLASOIL, cette différence de pression est donnée indépendamment de la profondeur de l'air du sol. Dans la réalité un gradient de pression s'établit dans l'air du sol.

Ainsi, dans la modélisation avec source finie décroissante effectuée ici, la source s'épuise par le haut, le toit de la source se trouve donc à une profondeur croissante dans le sol (de 0 à 3 m), mais le ΔP reste constant.

Cette approche est conservatoire, en particulier pour les substances moins volatiles (source proche de la dalle, où le ΔP est le plus surestimé).

Les conditions de ventilation et de fréquentation des lieux sont résumées dans le Tableau 5 et le Tableau 6 ci-après. On considère :

- Pour la disposition des lieux hors bâti : des zones de 150 m x 150 m comme convenu avec le GTT « terres excavées ».
- Pour les fréquentations des lieux :
 - ZAC : Zone récréative et logements : exposition en extérieur et en intérieur (rez-de-chaussée), enfant et adulte ;
 - ZI : mi-temps en extérieur et en intérieur (rez-de-chaussée), employé.

Le régime des vents est le régime standard de CSOIL/VOLASOIL.

Pour la hauteur de la pièce, nous retenons en bureau une valeur usuelle de 2,5 m, plus conservatoire que les 3 m retenus par VOLASOIL pour une habitation.

Pour le taux de ventilation en intérieur, nous retenons, parmi la gamme de taux de ventilations envisagés par VOLASOIL, respectivement le double et le quadruple de la valeur correspondant à une ventilation "normale" en habitation selon VOLASOIL. Pour les bureaux, le taux correspond à l'exigence réglementaire (article R. 232-12-26 du code du travail) d'un flux de ventilation minimal de 25 m³/h/occupant (appliqué ici à 10 m²/occupant).

Les autres valeurs d'entrée correspondent à des standards de modélisation, adaptés en ce qui concerne les fréquentations des lieux en zone industrielle et bureau.

La durée d'exposition de 6 ans pour les enfants correspond à une définition conventionnelle de la période "enfant". Les VTR chroniques de l'US EPA pour les effets à seuil sont considérées correspondre à une exposition moyennée sur une durée minimale de 7 ans. Dans notre scénario d'exposition avec enfants (ZAC résidentielle), les personnes sont considérées être présentes toute leur vie sur le site. Dès lors, ramener l'exposition sur 6 ans à une moyenne sur 7 ans introduirait un biais (faible (environ 15%) mais non conservatoire par rapport à la "réalité" du scénario) uniquement lié à une convention de définition (en l'occurrence de la période "enfant"). Pour éviter ce biais, nous avons ignoré la limitation conventionnelle à 6 ans de la durée d'exposition "enfant" pour les effets à seuil, en

retenant une durée d'exposition et une durée de moyennation de 7 ans en cas d'utilisation d'une VTR de l'US EPA.

Zone d'exposition	Zone d'émission	Personnes	Rythmes d'exposition				Ventilation		
			DE	fréquences FEM (h/j)			FEMcanc sur 70 ans	Hvd	Rv
				hiver	été	année			
années	h/j	h/j	h/j	h/j	m	h-1			
ZAC en extérieur (zones récréatives)	Extérieur	enfant	6	1h - 7j/7	8h - 7j/7	4,50	0,39		
		adulte	64	1h - 7j/7	3h - 5j/7 12h - 2j/7	3,29	3,0		
enfant		6	23h - 7j/7	16h - 7j/7	19,50	1,7			
ZAC en intérieur (RdC, complément)		adulte	64	14h - 5j/7 23h - 2j/7	12h - 7j/7	14,29	13,1		
ZI en extérieur (employé 50% dehors)		adulte	40	4h/j - 220 j/an		2,41	1,38		
ZI en intérieur (RdC, complément)		enfant	6	0		0	0		
		adulte	40	4h/j - 220 j/an		2,41	1,38		
BUREAUX (en intérieur)		enfant	6	0		0,0	0,0		
		employé adulte	40	8h/j - 220 j/an		4,82	2,76		
Local INDUSTRIEL ou COMMERCIAL (en intérieur)		Intérieur	usager enfant	6	0		0		2,5 1,07
	employé adulte	40	8h/j - 220 j/an		4,82	2,76	3,5 2,13		
usager enfant	6	0		0					

Fréquence d'exposition moyenne (annuelle) à l'air considéré

Durée d'exposition

Fréquence d'exposition moyenne sur 70 ans à l'air considéré

Hauteur en intérieur

Taux d'échange d'air intérieur

FEM h/j

DE ans

FEMcanc h/j

Hvd m

Rv h-1

Grisé: donnée d'entrée

Fond blanc: calculé

Tableau 5 : Conditions de ventilation des bâtiments et de fréquentation des différents lieux

Paramètre	Symbole	Unité	Valeur
Longueur de la zone d'émission dans le sens du vent	Lw	m	150
Hauteur de mélange, adulte	DHa	m	1,5
Hauteur de mélange, enfant	DHc	m	1
Vitesse du vent	V	m/s	3

Tableau 6 : Conditions de dispersion des vapeurs en extérieur

Annexe 3 : Données physico-chimiques et toxicologiques des substances

ANNEXE 3 : Données physico-chimiques et toxicologiques des substances

SOMMAIRE

1. OBJET DE L'ANNEXE	2
2. DONNEES PHYSICO-CHIMIQUES.....	2
3. VALEURS TOXICOLOGIQUES DE REFERENCES.....	7

Liste des tableaux

Tableau 1 : Description d'une distribution de 20 valeurs de Koc mesurées pour le benzène.....	3
Tableau 2 : Valeurs des paramètres physico-chimiques	6
Tableau 3 : Choix des Valeurs Toxicologiques de Référence	10

1. OBJET DE L'ANNEXE

La modélisation comprend le choix de données d'entrée pour les propriétés physico-chimiques et toxicologiques des substances.

Cette annexe présente ces données, les choix associés, et leurs justifications.

2. DONNEES PHYSICO-CHIMIQUES

Solubilité dans l'eau S

La solubilité définit la concentration d'une substance se dissolvant dans l'eau lorsque l'eau et cette substance sont en équilibre. Cette propriété indique la tendance à la mobilisation de la substance par lessivage. Elle est fonction de la température T , et s'exprime en milligrammes par litre (mg/l).

Constante de Henry H

La constante de Henry caractérise la propriété d'une substance à se partager entre les phases air et eau. Cette propriété indique la tendance à la volatilisation d'une substance depuis la phase eau. La constante de Henry est fonction de la température T . Elle s'exprime le plus souvent en pascals mètres cubes par mole ($\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{mol}$), et parfois sans unité comme le rapport de deux concentrations : $(\text{mg}/l_{\text{air}})/(\text{mg}/l_{\text{eau}})$.

En l'absence de valeur, H peut être estimée par la formule $H = P_v \cdot M / S$, où M est la masse molaire de la substance en grammes par moles (g/mol) et P_v la pression de vapeur (Pa). La pression de vapeur est la pression partielle d'un composé dans la phase gazeuse en équilibre avec le solide pur ou le liquide pur. Elle traduit la tendance d'une substance à s'évaporer. Elle est fonction de la température T , et s'exprime en pascals (Pa). Le lien entre la valeur H' sans unité et la valeur H en $\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{mol}$ est donné par la relation $H = H' \cdot R \cdot T$, où $R = 8,3144 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{mol}\cdot\text{K}$ est la constante des gaz parfaits.

Coefficient de partage octanol / eau K_{ow}

Le coefficient de partage octanol / eau est le rapport de concentration à l'équilibre d'un composé entre une phase eau et une phase octanol. La polarité d'un composé influe sur sa capacité à être fixé par la matière organique du sol, et est directement reliée à K_{ow} . Le coefficient de partage octanol / eau est un rapport de concentrations $(\text{mg}/l_{\text{oct}})/(\text{mg}/l_{\text{eau}})$, et n'a donc pas d'unité. Il est habituellement donné sous la forme de son logarithme à base dix. La mesure de K_{ow} est précise.

Coefficient de partage carbone organique / eau K_{oc}

Le coefficient de partage carbone organique / eau est le rapport entre la quantité adsorbée d'un composé par unité de masse de carbone organique du sol et la concentration de ce même composé en solution aqueuse à l'équilibre. Il caractérise la tendance d'un composé à être retenu par la matière organique des sols, et définit la distribution d'un composé entre les phases solide et liquide d'un sol. Le coefficient de partage carbone organique / eau peut s'écrire comme le

rapport d'une teneur par unité de masse de carbone organique et d'une concentration dans l'eau (mg/kg_{co})/(mg/l_{eau}), et s'exprime donc en litres par kilogramme (l/kg).

En l'absence de valeur, *Koc* peut être estimé par la formule de CSOIL/VOLASOIL $Koc = 0,411 \times \log(Kow)$ (van den Berg, 1994), ou toute autre formule jugée plus pertinente pour les substances ou les types de sols étudiés.

L'estimation de *Koc* en général, et par une formule en particulier, est sujette à de fortes incertitudes, qui résultent de la variabilité de *Koc* suivant la nature du support considéré. Cette variabilité de *Koc* peut être observée à travers une distribution de 20 valeurs de *Koc* mesurées pour le benzène (reprises de la littérature: US EPA, 1994; Rippen, 1996 ; sans précision sur les conditions de mesure), décrite dans le Tableau 1¹ :

Caractéristique	Max	Min	Moyenne arithmétique	Médiane	Moyenne géométrique	5 ^e centile
Valeur (mg/kg _{ms})/(mg/l)	100	19	60	59,7	54,5	26

Tableau 1 : Description d'une distribution de 20 valeurs de *Koc* mesurées pour le benzène

La formule proposée ci-avant est considérée par le RIVM hollandais comme raisonnablement conservatoire. Elle a été contrôlée sur 49 substances, avec une déviation maximale limitée à un facteur 3, à quelques exceptions près (van den Berg, 1994). De fait, pour $\log Kow < 6,4$ (domaine le plus pertinent pour cette étude²), cette formule est plus pénalisante que la formule moyenne utilisée par le TPHCWG (1997a: Equation 1):

$$\text{Equation 1} \quad \log Koc = 0,82 \log Kow + 0,761.$$

En effet, la formule du RIVM s'écrit aussi :

$$\text{Equation 2} \quad \log Koc = \log 0,411 + \log Kow = \log Kow - 0,386.$$

Suivant une approche prudente, nous avons utilisé, à défaut de valeur disponible, la formule de CSOIL/VOLASOIL.

Toutefois, de même³ que pour la foc (cf. corps de texte), l'impact, sur les valeurs limites calculées, de l'incertitude sur *Koc*, reste nul ou limité dans le cadre de la configuration de site retenue.

¹ Par la suite, nous en avons retenu la médiane, arrondie à 60, très proche de la valeur utilisée dans CSOIL/VOLASOIL (55,5: issue de la formule).

² Il s'avérera en effet que les valeurs au delà ne posent pas de problème de risque sur le site (« Pas de valeur Limite »).

³ La foc est multipliée par le *Koc* dans la modélisation des transferts.

Coefficients de diffusion dans l'air D_a et dans l'eau D_w

Le coefficient de diffusion dans l'air, respectivement dans l'eau, décrit le mouvement d'une substance en phase gazeuse, respectivement aqueuse, en réponse à une différence de concentration de cette substance dans cette phase. Il dépend de la température. Le coefficient de diffusion peut s'écrire comme le rapport d'un flux ($\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) et d'une concentration (mg/l), d'où l'unité $[(\text{mg}/\text{m}^2/\text{s})/(\text{mg}/\text{l}/\text{m})$ ou 10^{-3} m/s]

En l'absence de valeur mesurée, D_a a été estimé selon la relation $D_a = 10^{-2} \times (76/M)^{1/2}$, et D_w selon la formule $D_w = 10^{-4} D_a$ (van den Berg, 1994).

Les données physico-chimiques des substances ont été recherchées dans :

- les fiches de données toxicologiques et environnementales des substances dangereuses de l'INERIS ;
- les fiches de HSDB (*Hazardous Substances Data Bank*) ;
- la documentation de CSOIL (van den Berg *et al.*, 1994) ;
- les fiches de données de Verschueren (1997) ;
- le rapport du TPHCWG (1997b).

En l'absence de valeur renseignée d'un paramètre d'une substance, ce paramètre est évalué par une des formules indiquées ci-dessus.

Les valeurs et leurs sources sont reportées dans le Tableau 2 ci-après. La cohérence et la documentation de ces valeurs présentent toutefois quelques lacunes : par exemple, les températures associées aux valeurs introduites ne sont pas toujours renseignées ou totalement cohérentes entre elles. Dans la gamme de températures pertinente (sol : 10-15°C), l'impact sur les valeurs des paramètres est considéré comme peu important au regard des autres incertitudes sur ces valeurs⁴.

⁴ Par ex. pour le coefficient de Henry [-], particulièrement sensible à la température d'après Bakker *et al.* (2008 p 116), et le chlorure de vinyle, pour lequel ce coefficient est particulièrement élevé :

- La Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques de l'INERIS rapporte une gamme de 0,87-3,28 entre 20 et 25°C (et retient 1,1).
- Verschueren (1997) donne des valeurs « calculées » de 0,60, 0,80, 1,10 à des températures de 10, 18 et 25°C respectivement, et une valeur « mesurée » de 2,29 à 25°C.
- Le modèle CSOIL utilise une valeur de 8,57 (van den Berg, 1994), sans indication de température.
- La base de données HSDB indique une valeur de 1,1 à 25°C.
- Selon la source consultée, la valeur de 1,1 retenue ici peut donc paraître conservatoire ou non pour la gamme de température pertinente (10-15°C).

L'impact de la température n'a pas été évalué plus avant dans la présente étude. Les sources consultées ne fournissent généralement pas de valeurs à différentes températures (quand celle-ci est indiquée) ; et la formule de variation du coefficient de Henry avec la température, rapportée par ex. par Bakker *et al.* (2008), fait appel à des enthalpies de vaporisation et de solubilisation dont la disponibilité n'est pas immédiate (recherche dans les sources consultées et sur Internet).

La mise en œuvre de cette démarche appelle les remarques suivantes :

- Pour les diffusivités dans l'eau et dans l'air des HAP, nous avons utilisé la formule indiquée ci-dessus à partir de la masse molaire, plutôt que les valeurs données par la source utilisée pour les HAP (TPHCWG, 1997a), par souci de cohérence de la formule utilisée et considérant que ces valeurs du TPHCWG étaient issues d'un calcul.
- Pour le coefficient de partage carbone organique / eau (Koc) et le coefficient Henry (H) du phénol, nous avons retenu :
 - le jeu de valeurs proposé par HSDB pour H et la formule de CSOIL (à partir du Kow) pour Koc,
 - plutôt que le jeu de valeurs proposé par la Fiche de l'INERIS (H environ 1,5 fois plus élevé et Koc 7 fois plus élevé),
dans une optique :
 - d'approche conservatoire : le jeu de valeurs de la Fiche de l'INERIS aboutit à des teneurs limites dans les terres excavées sensiblement identiques sous bâtiment de bureau, mais supérieures (d'un facteur 1,4 hors emprise des bâtiments) ;
 - et de cohérence dans l'extrapolation de Koc à partir de Kow : la valeur de Koc de la Fiche de l'INERIS est issue d'une extrapolation depuis Kow selon une formule (du *Technical Guidance Document* européen) différente (et moins conservatoire pour notre modélisation) que la formule de CSOIL reprise ici.
- Pour les PCB, les valeurs des paramètres varient fortement (un ordre de grandeur et plus) entre les éléments considérés. Les valeurs retenues sont celles d'une forme relativement volatile et donc pénalisante, le tri-chloro-biphényle.

Paramètre	Symbole	Unité	CV	cis-DCE	TCE	PCE	B	T	E	X	Ar >EC8- EC10	Ar >EC10- EC12	Ar >EC12- EC16	Ar >EC16- EC21	Ar EC35	Al EC6	Al >EC6- EC8	Al >EC8- EC10	Al EC10- EC12	Al >EC12- EC16	Al >EC16- EC21	Al >EC21	
Masse molaire	M	(g/mol)	62,50	96,94	131,39	165,83	78	90	102	102	120	130	150	190	240	81	100	130	160	200	270	320	
Source			F. Ineris	F. Ineris	F. Ineris	HSDb	van den Berg, 1994					TPHCWG, 1997a, Al>EC21 d'après HCT individuels >EC21											
coefficient de diffusion dans l'air	Da	(mg/m2/s)/(mg/l/m)	1,1E-2	7,4E-3	7,9E-3	7,2E-3	8,2E-3	7,4E-3	6,8E-3	6,8E-3	3,2E-3	2,9E-3	2,5E-3	2,0E-3	1,6E-3	4,7E-3	3,8E-3	2,9E-3	2,4E-3	1,9E-3	1,4E-3	1,2E-3	
Température de mesure	T	°C	25	25	25	25	van den Berg, 1994					nd											
Source			F. Ineris	F. Ineris	F. Ineris	F. Ineris	van den Berg, 1994					f° de M											
coefficient de diffusion dans l'eau	Dw	(mg/m2/s)/(mg/l/m)	1,2E-7	1,1E-6	9,1E-7	8,2E-7	8,2E-7	7,4E-7	6,8E-7	6,8E-7	3,2E-7	2,9E-7	2,5E-7	2,0E-7	1,6E-7	4,7E-7	3,8E-7	2,9E-7	2,4E-7	1,9E-7	1,4E-7	1,2E-7	
Température de mesure	T	°C	25	25	25	25	nd					nd											
Source			F. Ineris	F. Ineris	F. Ineris	F. Ineris	f° de Da					f° de Da											
Log du coefficient de partage n-Octanol/Eau	Log Kow	-	1,40	1,86	2,38	2,67	2,13	2,69	3,15	3,20	nd												
Température de mesure	T	°C	nd	nd	nd	nd	van den Berg, 1994					TPHCWG, 1997a											
Source			F. Ineris	F. Ineris	F. Ineris	F. Ineris	van den Berg, 1994					TPHCWG, 1997a											
Coefficient de partage carbone organique / eau, calculé de Kow	Koc	(mg/kg _{oc})/(mg/lw)	1,0E+1	3,0E+1	9,9E+1	1,9E+2	5,5E+1	2,0E+2	5,8E+2	6,5E+2													
Log du coefficient de partage C.org./Eau, littérature	Log Koc	-	8,0E+0	3,5E+1	1,1E+2	2,5E+2	6,0E+1	2,0E+2	5,8E+2	6,5E+2	3,20	3,40	3,70	4,00	5,10	2,90	3,60	4,50	5,40	6,70	8,8	11,27	
Coefficient de partage carbone organique / eau, retenu	Koc	(mg/kg _{oc})/(mg/lw)	nd	nd	nd	nd	nd					nd											
Température de mesure	T	°C	nd	nd	nd	nd	nd					nd											
Source			F. Ineris basse	F. Ineris Calcul US EPA	F. Ineris	F. Ineris	Cf. A3	f° de Kow					TPHCWG, 1997a, Al>EC21 d'après HCT individuels >EC21										
Solubilité	S	mg/l	1,6E+3	8,0E+2	1,1E+3	1,5E+2	1,8E+3	5,0E+2	1,7E+2	1,8E+2	6,5E+1	2,5E+1	5,8E+0	6,5E-1	6,6E-3	3,6E+1	5,4E+0	4,3E-1	3,4E-2	7,6E-4	2,5E-6	3,0E-7	
Température de mesure	T	°C	20-25	20	20	25	nd					nd											
Source			F. Ineris	F. Ineris	F. Ineris	F. Ineris	van den Berg, 1994					TPHCWG, 1997a, Al>EC21 d'après HCT individuels >EC21											
Coefficient de Henry	H	Pa.m3/mol	2,73E+3	3,3E+2	1,0E+3	1,8E+3																	
Température de mesure	T	°C	20-25°C	20	nd	25	nd																
Température de mesure (par défaut 20°C)	T	K	293,15	293,15	293,15	298,15																	
Coefficient de Henry	H	(mg/la)/(mg/lw)	1,1E+0	1,3E-1	4,3E-1	7,4E-1	1,9E-1	2,2E-1	2,7E-1	1,9E-1	4,8E-1	1,4E-1	5,3E-2	1,3E-2	6,7E-4	3,3E+1	5,0E+1	8,0E+1	1,2E+2	5,2E+2	4,9E+3	1,0E+4	
Source			F. Ineris	F. Ineris	F. Ineris	F. Ineris	van den Berg, 1994					TPHCWG, 1997a, Al>EC21 d'après HCT individuels >EC21											
concentration de saturation dans l'air (= H x S)	Sa	mg/l	1,8E+3	1,1E+2	4,6E+2	1,1E+2	3,4E+2	1,1E+2	4,5E+1	3,5E+1	3,1E+1	3,5E+0	3,1E-1	8,5E-3	4,4E-6	1,2E+3	2,7E+2	3,4E+1	4,1E+0	4,0E-1	1,2E-2	3,0E-3	

Paramètre	Symbole	Unité	Naphtalène	Acénaphthylène	Acénaphthène	Fluoranthène	Phénanthrène	Anthracène	Fluoranthène	Pyrène	BaA	Chrysène	BbF	BkF	BaP	DahA	BghP	IcdP	Phénol	PCB (7)	PCB-A1254
Masse molaire	M	(g/mol)	128,19	152,2	154,21	166,2	178,2	178,2	202,3	202,3	228,3	228,3	252,32	252,32	252,3	278,4	268,36	276,3	94,11	257,5	257,5
Source			TPHCWG, 1997a																		
coefficient de diffusion dans l'air	Da	(mg/m2/s)/(mg/l/m)	3,0E-3	2,5E-3	2,5E-3	2,3E-3	2,1E-3	2,1E-3	1,9E-3	1,9E-3	1,7E-3	1,7E-3	1,5E-3	1,5E-3	1,5E-3	1,4E-3	1,4E-3	1,4E-3	8,2E-3	1,5E-3	1,5E-3
Température de mesure	T	°C	nd																		
Source			f° de M																		
coefficient de diffusion dans l'eau	Dw	(mg/m2/s)/(mg/l/m)	3,0E-7	2,5E-7	2,5E-7	2,3E-7	2,1E-7	2,1E-7	1,9E-7	1,9E-7	1,7E-7	1,7E-7	1,5E-7	1,5E-7	1,5E-7	1,4E-7	1,4E-7	1,4E-7	8,8E-7	1,5E-7	1,5E-7
Température de mesure	T	°C	nd																		
Source			f° de Da																		
Log du coefficient de partage n-Octanol/Eau	Log Kow	-	3,36	4	3,92	4,18	4,57	4,54	5,22	5,18	5,91	5,79	5,8	6	6,35	6,75	6,5	7	1,47	5,6	5,6
Température de mesure	T	°C	nd																		
Source			TPHCWG, 1997a																		
Coefficient de partage carbone organique / eau, calculé de Kow	Koc	(mg/kg _{oc})/(mg/lw)	9,4E+2	4,1E+3	3,4E+3	6,2E+3	1,5E+4	1,4E+4	6,8E+4	6,2E+4	3,3E+5	2,5E+5	2,6E+5	4,1E+5	9,2E+5	2,3E+6	1,3E+6	4,1E+6	1,2E+1	1,6E+5	1,6E+5
Log du coefficient de partage C.org./Eau, littérature	Log Koc	-	8,4E+2	2,8E+3	2,4E+3	3,9E+3	8,1E+3	7,7E+3	2,8E+4	2,6E+4	1,0E+5	8,1E+4	8,3E+4	1,2E+5	1,3E+5	5,0E+5	3,1E+5	8,0E+5	1,2E+1	1,6E+5	1,6E+5
Coefficient de partage carbone organique / eau, retenu	Koc	(mg/kg _{oc})/(mg/lw)	nd																		
Température de mesure	T	°C	nd																		
Source			TPHCWG, 1997a																		
Solubilité	S	mg/l	3,0E+1	1,6E+1	3,8E+0	1,9E+0	1,1E+0	4,5E-2	2,6E-1	1,3E-1	1,1E-2	1,5E-3	1,5E-3	8,0E-4	3,0E-4	5,0E-4	3,0E-3	6,2E-2	8,4E+4	2,3E-1	2,3E-1
Température de mesure	T	°C	nd																		
Source			F. Ineris																		
Coefficient de Henry	H	Pa.m3/mol	nd																		
Température de mesure	T	°C	nd																		
Température de mesure (par défaut 20°C)	T	K	nd																		
Coefficient de Henry	H	(mg/la)/(mg/lw)	4,2E-3	3,4E-3	4,9E-3	3,2E-3	1,3E-3	1,6E-3	4,2E-4	3,7E-4	2,3E-4	1,8E-4	6,5E-6	6,5E-6	4,7E-6	3,1E-6	3,0E-5	2,1E-11	298,15	3,4E-4	3,4E-4
Source			TPHCWG, 1997a, BkF pour BbF (Koc absent)																		
concentration de saturation dans l'air (= H x S)	Sa	mg/l	1,3E-1	5,5E-2	1,9E-2	6,1E-3	1,4E-3	7,2E-5	1,1E-4	4,9E-5	2,6E-6	2,7E-7	9,7E-9	5,2E-9	1,4E-9	1,5E-9	9,1E-8	1,3E-12	1,1E+0	7,7E-5	7,7E-5
F. Ineris: Fiches INERIS de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques			Vert: donnée d'entrée Sans couleur: calcul																		

Tableau 2 : Valeurs des paramètres physico-chimiques

3. VALEURS TOXICOLOGIQUES DE REFERENCES

Le choix des Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR) est détaillé dans le Tableau 3 ci-après. La démarche de choix a été d'assurer la cohérence avec le choix des VTR effectué pour l'interprétation des diagnostics de bâtiments accueillant du public établis sur d'anciens sites industriels, soit, par ordre de priorité :

1. Valeurs retenues pour les « diagnostics dans les établissements accueillant du public » (BRGM, 2010), sauf actualisation de VTR par l'organisme émetteur entre-temps (pour le Cis-DCE : valeur provisoire du RIVM de 2001 changée en valeur définitive en 2009). Ces valeurs intègrent les valeurs établies par le TPHCWG⁵ (1997a) pour les coupes d'hydrocarbures pétroliers.
2. Choix du ministère du Développement Durable (chlorure de vinyle) ou de l'AFSSET/ANSES.
3. VTR la plus pénalisante parmi les 6 sources principales de VTR (ATSDR⁶, OMS⁷, US EPA, OEHHA⁸, Santé Canada, RIVM⁹), en écartant toutefois d'éventuelles valeurs considérées comme manifestement excessives (expertise INERIS).

Les derniers calculs de valeurs seuils ont été réalisés en mai 2011; les modifications ultérieures dans les sources ci-dessus ne sont donc pas intégrées (notamment la mise à jour de début 2012 des choix pour les « établissements accueillant du public »).

Les six organismes ci-dessus n'adoptent pas les mêmes notations pour représenter les valeurs toxicologiques de référence, qu'ils s'agissent des effets non cancérigènes par inhalation (*MRL*, *CA*, *RfC*, *RELi*, *TC* ou *TCA*), des effets non cancérigènes par voie orale (*MRL*, *DJA*, *RfD*, *RELo*, *TDI*) ou des effets cancérigènes par inhalation (*ERUi*, *CT_{0,05}*, *UR* ou *URF*). Pour simplifier la lecture de ce document, le même acronyme sera utilisé pour toutes les bases de données. Il sera ainsi question de :

- concentration tolérable ou de référence *RfC*, pour désigner les valeurs toxicologiques de référence pour les effets non cancérigènes par inhalation ;
- excès de risque unitaire *ERUi* pour désigner les valeurs toxicologiques de référence pour les effets cancérigènes par inhalation.

⁵ *Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group.*

⁶ *Agency for Toxic Substances and Disease Registry.*

⁷ *Organisation Mondiale de la Santé.*

⁸ *Office of Environment Health Hazard Assessment* dépendant du *California Environmental Protection Agency.*

⁹ *Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu* : Institut National des Pays-Bas pour la Santé Publique et l'Environnement.

Concentration tolérable dans l'air ou de référence RfC

Pour les effets systémiques non cancérigènes, la concentration tolérable dans l'air par voie inhalation est une estimation de l'exposition par inhalation continue d'une population humaine sans risque appréciable d'effets néfastes durant une exposition chronique. Elle s'exprime en milligrammes de substance inhalée par mètre cube d'air inhalé (mg/m^3).

Cancérogénicité

Une substance est dite cancérigène si elle induit des tumeurs (bénignes ou malines), si elle augmente leur incidence, ou si elle accélère leur apparition. Les substances sont classées selon leur cancérogénicité par le CIRC (Centre International de Recherche sur le Cancer), l'US EPA et l'Union Européenne.

Pour le CIRC, les substances du groupe 1 sont cancérigènes pour l'être humain ; les substances du groupe 2A sont probablement cancérigènes ; les substances du groupe 2B pourraient être cancérigènes ; les substances du groupe 3 ne peuvent être classées quant à leur cancérogénicité pour l'être humain ; les substances du groupe 4 ne sont probablement pas cancérigènes.

Pour l'US EPA, les substances de la classe A sont cancérigènes pour l'être humain ; les substances des classes B1 et B2 sont probablement cancérigènes ; les substances de la classe C sont possiblement cancérigènes ; les substances de la classe D ne peuvent être classées quant à leur cancérogénicité pour l'être humain ; les substances de la classe E présentent des preuves de non cancérogénicité.

Pour l'Union Européenne, les substances de la classe 1 sont cancérigènes pour l'être humain ; les substances de la classe 2 sont assimilées à des substances cancérigènes pour l'être humain ; les substances de la classe 3 sont possiblement cancérigènes pour l'être humain.

Excès de risque unitaire par voie inhalation ERU_i

Pour les effets cancérigènes sans seuil, l'excès de risque unitaire par la voie inhalation est la probabilité supplémentaire, par rapport à un sujet non exposé, qu'un individu a de développer l'effet s'il est exposé par la voie inhalation à une unité de dose ou de concentration de la substance (généralement) considérée pendant sa vie entière. L'excès de risque unitaire par voie inhalation s'exprime comme l'inverse d'une concentration en substance dans l'air (mg/m^3)⁻¹.

Les six organismes ci-dessus n'adoptent pas les mêmes définitions d'une exposition chronique pour les effets à seuil, en termes de durée minimale d'exposition : cette durée minimale d'exposition chronique est de :

- 1 an pour l'ATSDR ;
- 7 ans pour l'US EPA ;
- non précisée pour les autres sources. De manière conservatoire pour le cas d'une exposition décroissant avec le temps, nous la considérons alors par défaut égale à 1 an, en l'absence d'approfondissement spécifique.

La VTR chronique pour un effet à seuil est considérée correspondre à une exposition moyenne sur cette durée d'exposition. En évaluation des risques, c'est donc une exposition moyennée sur cette durée qui est comparée à la VTR.

Les concentrations tolérables dans l'air pour des effets chroniques estimées par dérivation d'autres VTR (pour des effets sub-chroniques ou pour l'exposition par ingestion) ne sont pas considérées comme des VTR, dans la mesure où les instituts spécialisés dans l'établissement de telles VTR n'ont pas souhaité recourir par eux-mêmes à de telles dérivations.

Les incertitudes associées aux VTR se situent à deux niveaux :

1. concepts d'extrapolation à partir des observations d'effets (principalement : extrapolation à de faibles doses pour les effets sans seuil, extrapolation de l'animal à l'homme pour les effets à seuil) ;
2. sélection des effets à considérer comme pertinents et des facteurs ou modes d'extrapolation par les organismes qui proposent ces VTR (par exemples facteurs d'incertitudes 10 à 3000 appliqués entre les seuils d'observation d'effets sur animaux et les VTR, pour les effets à seuil).

Les VTR intègrent des choix de gestion (effectués de fait par les toxicologues), notamment au niveau de la sélection des effets et de la durée d'exposition à considérer comme pertinents. Elles sont en partie de nature conventionnelle. Elles peuvent varier entre organismes d'un ordre de grandeur environ. Le choix d'écartier les valeurs considérées comme manifestement excessives (expertise INERIS) réduit à notre sens la gamme des incertitudes à un ordre de grandeur environ.

Paramètre	Symbole	Unité	CV	cis-DCE	TCE	PCE	B	T	E	X	Ar >EC8-EC10	Ar >EC10-EC12	Ar >EC12-EC16	Ar >EC16-EC21	Ar >EC21-EC35	AI EC5-EC6	AI >EC6-EC8	AI >EC8-EC10	AI >EC10-EC12	AI >EC12-EC16	AI >EC16-EC21	AI >EC21
CAS			75-01-4	156-59-2	79-01-6	127-18-4	71-43-2	108-88-3	100-41-4	1330-20-7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Concentration de référence (effets à seuils)	RfC	mg/m3	5,6E-2	6,0E-2	2,0E-1	3,5E-2	9,6E-3	2,6E-1	2,7E-1	1,0E-1	2,0E-1	2,0E-1	2,0E-1	ND	ND	1,8E+1	1,8E+1	1,0E+0	1,0E+0	1,0E+0	ND	ND
Durée d'exposition considérée	t	an	1	1	1	1	1	1	1	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Source RfC			RIVM, 2001	RIVM, 2009	AFSSET, 2009	OEHHA, 1991	ATSDR, 2007	OMS, 2000	ATSDR	US EPA, 2003	TPH CWG	TPH CWG	TPH CWG	TPH CWG	TPH CWG	TPH CWG	TPH CWG	TPH CWG	TPH CWG	TPH CWG	TPH CWG	TPH CWG
Excès de risque unitaire, inhalation (effets sans seuil)																						
Exposition pendant la "vie entière"	ERU,c	(mg/m3)-1	1,0E-3	ND	2,0E-3	5,9E-3	6,0E-3	ND	2,5E-3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Exposition pendant "vie adulte" seule	ERU,c	(mg/m3)-1	1,0E-3	ND	2,0E-3	5,9E-3	6,0E-3	ND	2,5E-3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
FET: Facteur d'Equivalence Toxicologique (INERIS, 2003)																						
Source ERU			MEDD, 2001		OEHHA, 2005	OEHHA, 2005	OMS, 2000		OEHHA, 2007													
Remarque				ETS: 3E-2 mg/m3: RIVM, 2001	ETS: VGAI: effet sans seuil	ETS: VGAI: effet à seuil	ERUi: Valeur du CHSPF	ETS: VGAI: effet sans seuil		Choix ineris: ATSDR: 0,22 mg/m3												

Paramètre	Symbole	Unité	Naphtalène	Acénaphthylène	Acénaphhtène	Fluorène	Phénanthrène	Anthracène	Fluoranthène	Pyrène	BaA	Chrysène	BbF	BkF	BaP	DahA	BghP	lcdP	Phénol	PCB (7)	PCB-A1254
CAS			91-20-3	208-96-8	83-32-9	86-73-7	85-01-8	120-12-7	206-44-0	129-00-0	56-55-3	218-01-9	205-99-2	207-08-9	50-32-8	53-70-3	191-24-2	139-39-5	108-95-2	1336-36-3	1336-36-3
Concentration de référence (effets à seuils)	RfC	mg/m3	3,0E-3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2,0E-2	5,0E-4	1,0E-3
Durée d'exposition considérée	t	an	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Source RIC			US EPA, 1998																RIVM, 2001	RIVM, 2001	RIVM, 2001
Excès de risque unitaire, inhalation (effets sans seuil)																					
Exposition pendant la "vie entière"	ERU,c	(mg/m3)-1	3,4E-2	1,1E-3	1,1E-3	1,1E-3	1,1E-3	1,1E-2	1,1E-3	1,1E-3	1,1E-1	1,1E-2	1,1E-1	1,1E-1	1,1E+0	1,1E+0	1,1E-2	1,1E-1	ND	1,1E+0	5,7E-1
Exposition pendant "vie adulte" seule	ERU,c	(mg/m3)-1	3,4E-2	1,1E-3	1,1E-3	1,1E-3	1,1E-3	1,1E-2	1,1E-3	1,1E-3	1,1E-1	1,1E-2	1,1E-1	1,1E-1	1,1E+0	1,1E+0	1,1E-2	1,1E-1	ND	2,2E-1	1,1E-1
FET: Facteur d'Equivalence Toxicologique (INERIS, 2003-2006)			0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,01	0,001	0,001	0,1	0,01	0,1	0,1	1	1	0,01	0,1			
Source ERU																					
Remarque			ETS: VGAI: effet à seuil																Choix ineris: OEHHA: 0,2 mg/m3	D'après Arochlor 1996 Pas dans ETS	OEHHA 1996 Pas dans ETS

En vert: Valeur ETS (diagnostics de bâtiments accueillant du public établis sur d'anciens sites industriels)

ND: non déterminé (pas de VTR)

VGAI: Valeur Guide Air Intérieur (AFSSET/ANSES)

Cf. Détails en Annexe 3 du rapport.

Tableau 3 : Choix des Valeurs Toxicologiques de Référence

Annexe 4 : Adaptation des teneurs limites calculatoires en valeurs seuils

ANNEXE 4 : Adaptation des teneurs limites calculatoires en valeurs seuils

SOMMAIRE

1. OBJET DE L'ANNEXE.....	2
2. HAP	2
3. HYDROCARBURES PETROLIERS C5-C10 ET C10-C40.....	2
4. PCB	10
5. INDICE PHENOL.....	12

Liste des tableaux

Tableau 1 : Premier traitement de la composition du gasoil donnée par le TPHCWG	5
Tableau 2 : Proportions reconstituées des différentes coupes d'hydrocarbures au sein des groupes C5-C10 et C10-C40	6
Tableau 3 : Teneurs limites obtenues pour les groupes d'hydrocarbures C5-C10 et C10-C40 suivant les différents modes d'extrapolation.....	9
Tableau 4 : Concentrations de bruit de fond en PCB dans les sols d'après la littérature	10
Tableau 5 : Concentrations de bruit de fond en PCB dans les sols du Grand Lyon	11

1. OBJET DE L'ANNEXE

Le passage des teneurs limites calculées aux valeurs seuils proposées a fait intervenir différents choix intégrant des options de gestion retenues par le GTT « terres excavées », et en particulier le choix de fixer des valeurs seuils pour toutes les substances retenues même lorsque le calcul de risque conclut à une absence de teneur limite.

Ces choix et le processus d'adaptation appliqué sont détaillés ci-après.

2. HAP

Pour les HAP, seul le naphtalène a été retenu pour l'établissement de valeurs seuils, en tant que traceur pertinent. Les autres HAP, plus lourds et donc moins concernés par le transfert de vapeurs, sont couverts par les valeurs seuils retenues pour le naphtalène (par ex. pour des pollutions de type usine à gaz) et pour les hydrocarbures C10-C40 (pour des hydrocarbures de type gasoil), compte tenu des teneurs limites respectives obtenues et des proportions des différents HAP dans les différents produits rencontrés sur sites pollués.

3. HYDROCARBURES PETROLIERS C5-C10 ET C10-C40

Pour les hydrocarbures C5-C10 et C10-C40, les teneurs limites calculées sur les différentes coupes aliphatiques et aromatiques ont été regroupées en deux valeurs, au *pro rata* des proportions respectives des différentes coupes au sein de ces deux groupes d'hydrocarbures dans deux hydrocarbures de référence (essence pour C5-C10 et gasoil pour C10-C40). Ces proportions ont été reconstituées à partir des compositions d'hydrocarbures types établies par le TPHCWG (1997a). Préalablement à ces regroupements, des teneurs limites ont été affectés à différentes coupes ne présentant pas de valeur limite (PVL) à l'issue des calculs (teneurs limites au-delà de la saturation). Pour assurer la cohérence des valeurs retenues entre substances et scénarios, l'INERIS a proposé et appliqué le choix de se baser sur les teneurs limites avant contrôle de la saturation.

Le mode opératoire correspondant est articulé en quatre phases comme précisé ci-après.

Phase 1 : Choix de deux hydrocarbures types représentant les groupes C5-C10 et C10-C40 et reconstitution des proportions respectives des différentes coupes au sein de ces deux hydrocarbures types :

1. *Parmi les hydrocarbures de référence décrits par le TPHCWG (1997a), le groupe C10-C40 pouvait être représenté par le fuel (fuel oil n°2) ou le gasoil. Dans une optique conservatoire, le gasoil a été préféré au fuel car il présente une plus importante coupe >C10-C12 (plus volatile donc présentant des teneurs limites calculées plus basses, à VTR égale). Des compositions d'essence et de gasoil vieillis (dans un sol) auraient été a priori plus représentatives de situations de sites pollués, mais n'étaient pas disponibles dans le cadre de cette étude. Les compositions retenues d'essence et de gasoil non vieillis sont plus riches en fractions légères, davantage volatiles et dégradables que les fractions lourdes, donc conservatoires dans l'évaluation des risques.*
2. Le TPHCWG (1997a) ne fournit pas les proportions respectives des différentes coupes au sein de ces deux hydrocarbures de référence, mais des gammes de pourcentages massiques (parfois volumiques) des hydrocarbures individuels qui y ont été mesurés (avec indication des nombres équivalents de carbone rattachés à ces hydrocarbures individuels). Ces gammes ont été traitées selon les étapes suivantes :
 1. saisie sous Excel® ;
 2. assimilation des (deux) gammes exprimées en pourcentages volumiques, à des pourcentages massiques (*légère approximation : non prise en compte des différences de densité entre hydrocarbures*) ;
 3. conversion d'une gamme exprimée en mg/kg, en pourcentage massique, par application d'une densité de 0,8 kg/L ;
 4. remplacement des non-détections par zéro (*la limite de quantification reportée était parfois élevée par rapport aux hydrocarbures quantifiés*) ;
 5. calcul de la moyenne arithmétique et géométrique des deux bornes de chaque gamme ;
 6. affectation des bornes et moyennes de chaque hydrocarbure à une des coupes aliphatiques ou aromatiques ;
 7. sommation des moyennes arithmétiques d'une part, géométrique d'autre part ;
 8. contrôle de la cohérence des compositions obtenues, voire lissage *a posteriori* en cas d'irrégularité marquée : pour le gasoil, la proportion calculée pour les Ar >EC10-EC12, située au moins à un facteur 2 sous celle des coupes Ar >EC8-EC10 et Ar >EC12-EC16, a été remplacée par la moyenne (géométrique) des proportions de ces deux coupes dans le gasoil (*le fuel ne présentait pas cette irrégularité dans les données*) ;

9. "normalisation" des coupes, de sorte à obtenir une somme des pourcentages égales à 100% sur un hydrocarbure type : *les pourcentages reconstitués ne représentent que 22% du total à partir de la moyenne géométrique, 27% à partir de la moyenne arithmétique, et 37% à partir de la borne haute ; ces valeurs sont moindres pour le fuel n°2, et respectivement de 75%, 98% et 150% pour l'essence ;*
10. calcul des proportions respectives des différentes coupes au sein des deux groupes d'hydrocarbures (C5-C10 et C10-C40) selon les deux hydrocarbures types (essence et gasoil).
11. choix entre le minimum, le maximum, la moyenne arithmétique et la moyenne géométrique pour représenter chaque hydrocarbure : Par la suite, ce sont les données issues des moyennes géométriques qui seront utilisées pour les extrapolations entre coupes sur les teneurs limites calculées. *Ce choix permet de "lisser" l'impact des écarts importants entre minimum et maximum.*

Les étapes 1 à 4 ci-dessus, et le rattachement de chaque hydrocarbure comme aliphatique ou aromatique, sont illustrés dans le Tableau 1 ci-après pour le gasoil, qui dispose d'une soixantaine de composés renseignés (150 composés pour l'essence).

Le résultat de cette phase 1 de reconstitution des proportions respectives des différentes coupes au sein des deux hydrocarbures types retenus, est reporté dans le Tableau 2 p 6.

Ce processus comporte des limites dans les données de départ (connaissance incomplète de la composition des d'hydrocarbures types, surtout du gasoil et du fuel), et des approximations ou des choix dans leur traitement (conversions, lissage sur le gasoil). Les proportions respectives reconstituées des différentes coupes au sein des deux groupes d'hydrocarbures (C5-C10 et C10-C40) ont donc un caractère largement indicatif.

En % massique	Données d'entrée du TPHCWG				Données retravaillées					Ai / Aro
	Composé	N carbones	EC	% poids min % poids max	EC	% poids min	% poids max	Moyenn géomq	Moyenn arithmq	
Straight	Chain	Alkanes								
n-Octane	8	8	0,1	0,1	8	0,1	0,1	0,1	0,1	ali
n-Nonane	9	9	0,19	0,49	9	0,19	0,49	0,3051	0,3400	ali
n-Decane	10	10	0,28	1,2	10	0,28	1,2	0,5797	0,7400	ali
n-Undecane	11	11	0,57	2,3	11	0,57	2,3	1,1450	1,4350	ali
n-Dodecane	12	12	1	2,5	12	1	2,5	1,5811	1,7500	ali
n-Tridecane	13	13	1,5	2,8	13	1,5	2,8	2,0494	2,1500	ali
n-Tetradecane	14	14	0,61	2,7	14	0,61	2,7	1,2834	1,6550	ali
n-Pentadecane	15	15	1,9	3,1	15	1,9	3,1	2,4269	2,5000	ali
n-Hexadecane	16	16	1,5	2,8	16	1,5	2,8	2,0494	2,1500	ali
n-Heptadecane	17	17	1,4	2,9	17	1,4	2,9	2,0149	2,1500	ali
n-Octadecane	18	18	1,2	2	18	1,2	2	1,5492	1,6000	ali
n-Nonadecane	19	19	0,7	1,5	19	0,7	1,5	1,0247	1,1000	ali
n-Eicosane	20	20	0,4	1	20	0,4	1	0,6325	0,7000	ali
n-Heneicosane	21	21	0,26	0,83	21	0,26	0,83	0,4645	0,5450	ali
n-Docosane	22	22	0,14	0,44	22	0,14	0,44	0,2482	0,2900	ali
n-Tetracosane	24	24	0,35	0,35	24	0,35	0,35	0,3500	0,3500	ali
Branched	Chain	Alkanes						0,0000	0,0000	
3-Methylundecane	12		0,09	0,28	12,1	0,09	0,28	0,1587	0,1850	ali
2-Methyldodecane	13		0,15	0,52	13,1	0,15	0,52	0,2793	0,3350	ali
3-Methyltridecane	14		0,13	0,3	14,1	0,13	0,3	0,1975	0,2150	ali
2-Methyltetradecane	15		0,34	0,63	15,1	0,34	0,63	0,4628	0,4850	ali
Alkyl	Benzenes						0,0000	0,0000		
Benzene	6	6,5	0,003	0,1	6,5	0,003	0,1	0,0173	0,0515	aro
Toluene	7	7,581	0,007	0,7	7,581	0,007	0,7	0,0700	0,3535	aro
Ethylbenzene	8	8,5	0,007	0,2	8,5	0,007	0,2	0,0374	0,1035	aro
o-Xylene	8	8,81	0,001	0,085	8,81	0,001	0,085	0,0092	0,0430	aro
m-Xylene	8	8,6	0,018	0,512	8,6	0,018	0,512	0,0960	0,2650	aro
p-Xylene	8	8,61	0,018	0,512	8,61	0,018	0,512	0,0960	0,2650	aro
Styrene	9	8,83	<0,002	<0,002	8,83	0	0	0,0000	0,0000	aro
1-Methyl-4-isopropylbenzene	10	10,13	0,003	0,026	10,13	0,003	0,026	0,0088	0,0145	aro
1,3,5-Trimethylbenzene	9	9,62	0,09	0,24	9,62	0,09	0,24	0,1470	0,1650	aro
n-Propylbenzene	9	9,47	0,03	0,048	9,47	0,03	0,048	0,0379	0,0390	aro
Isopropylbenzene	9	9,13	<0,01	<0,01	9,13	0	0	0,0000	0,0000	aro
n-Butylbenzene	10	10,5	0,031	0,046	10,5	0,031	0,046	0,0378	0,0385	aro
Biphenyl	12		0,01	0,12	12,5	0,01	0,12	0,0346	0,0650	aro
Naphtheno-Benzenes								0,0000	0,0000	aro
Fluorene	13	16,55	0,034	0,15	16,55	0,034	0,15	0,0714	0,0920	aro
Fluoranthene	16	21,85	7E-07	0,02	21,85	7E-07	0,02	0,0001	0,0100	aro
Benz(b)fluoranthene	20	30,14	3E-07	0,000194	30,14	3E-07	0,000194	0,0000	0,0001	aro
Benz(k)fluoranthene	20	30,14	3E-07	0,000195	30,14	3E-07	0,000195	0,0000	0,0001	aro
Indeno (1,2,3-cd) pyrene	22	35,01	0,000001	0,000097	35,01	0,000001	0,000097	0,0000	0,0000	aro
Alkyl	Naphthalenes						0,0000	0,0000		
Naphthalene	10	11,69	0,01	0,8	11,69	0,01	0,8	0,0894	0,4050	aro
1-Methylnaphthalene	11	12,99	0,001	0,81	12,99	0,001	0,81	0,0285	0,4055	aro
2-Methylnaphthalene	11	12,84	0,001	1,49	12,84	0,001	1,49	0,0386	0,7455	aro
1,3-Dimethylnaphthalene	12	14,77	0,55	1,28	14,77	0,55	1,28	0,8390	0,9150	aro
1,4-Dimethylnaphthalene	12	14,6	0,11	0,23	14,6	0,11	0,23	0,1591	0,1700	aro
1,5-Dimethylnaphthalene	12	13,87	0,16	0,36	13,87	0,16	0,36	0,2400	0,2600	aro
Polynuclear	Aromatics						0,0000	0,0000		
Anthracene	14	19,43	0,000003	0,02	19,43	0,000003	0,02	0,0002	0,0100	aro
2-Methyl anthracene	15	20,73	0,000015	0,018	20,73	0,000015	0,018	0,0005	0,0090	aro
Phenanthrene	14	19,36	0,000027	0,3	19,36	0,000027	0,3	0,0028	0,1500	aro
1-Methylphenanthrene	15	20,73	0,000011	0,024	20,73	0,000011	0,024	0,0005	0,0120	aro
2-Methylphenanthrene	15		0,014	0,18	20,73	0,014	0,18	0,0502	0,0970	aro
3-Methylphenanthrene	15		0,000013	0,011	20,73	0,000013	0,011	0,0004	0,0055	aro
4 & 9-Methylphenanthrene	15		0,00001	0,034	20,73	0,00001	0,034	0,0006	0,0170	aro
Pyrene	16	20,8	0,000018	0,015	20,8	0,000018	0,015	0,0005	0,0075	aro
1-Methylpyrene	17		2,4E-06	0,00137	21,8	2,4E-06	0,00137	0,0001	0,0007	aro
2-Methylpyrene	17		3,7E-06	0,00106	21,8	3,7E-06	0,00106	0,0001	0,0005	aro
Benz(a)anthracene	18	26,37	2,1E-06	0,00067	26,37	2,1E-06	0,00067	0,0000	0,0003	aro
Chrysene	18	27,41	0,000045	0,000045	27,41	0,000045	0,000045	0,0000	0,0000	aro
Triphenylene	18	26,61	0,00033	0,00033	26,61	0,00033	0,00033	0,0003	0,0003	aro
Cyclopenta(cd)pyrene	18		0,000002	0,0000365	28	0,000002	3,65E-05	0,0000	0,0000	aro
1-Methyl-7-isopropylphenanthrene	18		1,5E-06	0,00399	28	1,5E-06	0,00399	0,0001	0,0020	aro
3-Methylchrysene	19		<0,001	<0,001	28	0	0	0,0000	0,0000	aro
6-Methylchrysene	19		<0,0005	<0,0005	28	0	0	0,0000	0,0000	aro
Benz(a)pyrene	20	31,34	0,000005	0,00084	31,34	0,000005	0,00084	0,0001	0,0004	aro
Benz(e)pyrene	20	31,17	5,4E-06	0,00024	31,17	5,4E-06	0,00024	0,0000	0,0001	aro
Perylene	20	31,34	<0,0001	<0,0001	31,34	0	0	0,0000	0,0000	aro
Benz(ghi)perylene	22	34,01	9E-07	0,00004	34,01	9E-07	0,00004	0,0000	0,0000	aro
Picene	22		4E-07	0,000083	35	4E-07	0,000083	0,0000	0,0000	aro
	N carbones: nombre de carbones				Case grisée: EC extrapolé depuis HC proche					

Tableau 1 : Premier traitement de la composition du gasoil donnée par le TPHCWG

En % massique	Moyenne géométrique				Moyenne géométrique				Moyenne géométrique				Moyenne géométrique				Moy	
Groupe	C5-C10				C10-C40				C10-C40				C10-C40				< C5	Somme
Composé / Coupe	B	T	E	X	Ar >EC8- EC10	Al EC5- EC6	Al >EC6- EC8	Al >EC8- EC10	Ar >EC10- EC12	Ar >EC12 - EC16	Ar >EC16 - EC21	Ar >EC21 - EC35	Al > EC10- EC12	Al >EC12- EC16	Al >EC16- EC21	Al >EC21	Al <EC5	
DIESEL																		
Somme calculée	1,7E-2	7,0E-2	0,0E+0	0,0E+0	4,2E-1	0,0E+0	1,0E-1	8,8E-1	1,4E-1	1,3E+0	1,3E-1	8,7E-4	2,7E+0	8,9E+0	5,7E+0	6,0E-1	0,0E+0	21
Somme corrigée	1,7E-2	7,0E-2	0,0E+0	0,0E+0	4,2E-1	0,0E+0	1,0E-1	8,8E-1	7,5E-1	1,3E+0	1,3E-1	8,7E-4	2,7E+0	8,9E+0	5,7E+0	6,0E-1	0,0E+0	22
Somme normée	8,0E-2	3,2E-1	0,0E+0	0,0E+0	2,0E+0	0,0E+0	4,6E-1	4,1E+0	3,5E+0	6,2E+0	5,9E-1	4,0E-3	1,3E+1	4,1E+1	2,6E+1	2,8E+0	0,0E+0	100
Total Groupe	6,9E+0								9,3E+1								0,0E+0	100
Part (-) de coupe dans Groupe	1,2E-2	4,7E-2	0,0E+0	0,0E+0	2,8E-1	0,0E+0	6,7E-2	5,9E-1	3,7E-2	6,7E-2	6,3E-3	4,3E-5	1,4E-1	4,4E-1	2,8E-1	3,0E-2	#DIV/0!	
FUEL																		
Somme	0,0E+0	5,2E-2	0,0E+0	0,0E+0	3,3E-2	0,0E+0	1,0E-1	7,4E-1	6,0E-2	1,0E+0	8,5E-1	3,4E-4	1,9E+0	6,8E+0	3,9E+0	1,0E-1	0,0E+0	15
Somme normée	0,0E+0	3,4E-1	0,0E+0	0,0E+0	2,2E-1	0,0E+0	6,5E-1	4,8E+0	3,9E-1	6,8E+0	5,5E+0	2,2E-3	1,2E+1	4,4E+1	2,5E+1	6,5E-1	0,0E+0	100
Total Groupe	6,0E+0								9,4E+1								0,0E+0	100
Part (-) de coupe dans Groupe	0,0E+0	5,6E-2	0,0E+0	0,0E+0	3,6E-2	0,0E+0	1,1E-1	8,0E-1	4,1E-3	7,2E-2	5,9E-2	2,3E-5	1,3E-1	4,6E-1	2,7E-1	6,9E-3	#DIV/0!	
GASOLINE																		
Somme	6,5E-1	7,7E+0	0,0E+0	0,0E+0	1,0E+1	1,9E+1	1,5E+1	4,0E+0	4,7E+0	5,7E-2	0,0E+0	2,4E-7	1,6E-1	0,0E+0	0,0E+0	0,0E+0	1,4E+1	75
Somme normée	8,6E-1	1,0E+1	0,0E+0	0,0E+0	1,3E+1	2,6E+1	2,0E+1	5,3E+0	6,3E+0	7,5E-2	0,0E+0	3,2E-7	2,2E-1	0,0E+0	0,0E+0	0,0E+0	1,8E+1	100
Total Groupe	7,5E+1								6,6E+0								1,8E+1	100
Part (-) de coupe dans Groupe	1,1E-2	1,4E-1	0,0E+0	0,0E+0	1,8E-1	3,4E-1	2,6E-1	7,1E-2	9,6E-1	1,1E-2	0,0E+0	4,8E-8	3,3E-2	0,0E+0	0,0E+0	0,0E+0	1,0E+0	

Tableau 2 : Proportions reconstituées des différentes coupes d'hydrocarbures au sein des groupes C5-C10 et C10-C40

Phase 2 : Attribution de teneurs limites pour les coupes ne présentant "Pas de Valeur Limite" (PVL) du fait de la saturation de l'équilibre multiphase dans le sol : deux pistes ont été suivies concomitamment :

- a. Extrapolation à partir des teneurs limites calculées pour les autres coupes du groupe considéré : pour chaque coupe sans teneur limite :
 1. des teneurs limites possibles sont calculées à partir des teneurs limites disponibles pour chacune des différentes coupes du même groupe C5-C10 ou bien C10-C40 ("coupes de départ"), au *prorata* des proportions respectives établies précédemment au sein du groupe d'hydrocarbures selon l'hydrocarbure de référence¹ ;
 2. on retient ensuite une moyenne de ces teneurs limites possibles pondérée selon les proportions des différentes "coupes de départ" au sein du groupe C5-C10 ou bien C10-C40.
- b. Fixation à la valeur calculée avant prise en compte de la saturation dans les sols.

Phase 3 : Attribution de teneurs limites pour les coupes ne présentant "Pas de Valeur Limite" (PVL) du fait de la saturation de l'absence de VTR : extrapolation suivant l'option 2) a. ci-dessus, mais à partir des deux jeux de teneurs limites issus de l'étape 2 ci-dessus (jeux issus respectivement de 2) a. et de 2) b.) ;

Phase 4 : Agrégation sur les groupes C5-C10 et C10-C40 :

3. Sommation des teneurs limites des coupes concernées. Cela est mathématiquement équivalent, pour chacun des deux groupes, C5-C10 ou C10-C40, à :
 1. extrapoler une teneur limite pour le groupe à partir de chacune des teneurs limites des coupes concernées, au *prorata* de la proportion de cette coupe au sein du groupe ;
 2. puis retenir une moyenne de ces teneurs limites pondérée selon les proportions des différentes coupes au sein du groupe.
4. Sélection du maximum entre les teneurs limites obtenues à partir des options 2) a. et 2) b.

D'autres choix d'agrégation sur les groupes C5-C10 et C10-C40 auraient été possibles. En particulier, pour assurer que la teneur limite de chaque coupe individuelle est respectée à travers la teneur limite du groupe, il aurait été logique de retenir le minimum des teneurs limites calculées pour le groupe à partir des coupes individuelles au prorata de leur poids dans le groupe. Ce mode

¹ Cette étape n'apparaît pas dans les feuilles de calcul : elle est directement intégrée dans le calcul par pondération de la valeur seuil du groupe C5-C10 ou C10-C40 (étape 4.1 appliquée aux "coupes de départ", calcul mathématiquement équivalent en termes de résultat sur les groupes).

d'extrapolation attribue toutefois de fait un poids considérable à la teneur limite la plus restrictive sur les différentes coupes individuelles, poids qui paraît excessif si la composition en coupes des groupes C5-C10 et C10-C40 n'est pas connue précisément, mais comme ici reconstituée de façon hypothétique.

La sélection du maximum entre les teneurs limites obtenues à partir des options 2) a. et 2) b. vise à tempérer le sur-conservatisme correspondant au remplacement de « PVL » par la teneur limite calculée avant prise en compte de la saturation de l'équilibre multiphase. Ce choix intervient pour le groupe C10-C20.

Les impacts de ces différents choix sont illustrés à travers le Tableau 3 ci-après².

² Pour l'agrégation par le minimum, on a écarté au préalable la teneur limite de C5-C10 correspondant au benzène et au toluène, qui constituent chacun la totalité des coupes Ar EC5-EC6 et Ar >EC6-EC8 respectivement, et qui disposeront de valeurs seuils individuelles.

Unité	C5-C10 "essence" d'après les différentes classes								C10-C40 "gasoil" d'après les différentes classes												
	B	T	Ar >EC8- EC10	Al EC5- EC6	Al >EC6- EC8	Al >EC8- EC10	Min hors B,T	Pondération: Σpoids Seuil (%)	Ar >EC10- EC12	Ar >EC12 - EC16	Ar >EC16 - EC21	Ar >EC21 - EC35	Al > EC10- EC12	Al >EC12- EC16	Al >EC16- EC21	Al >EC21	Min	Pondération: Σpoids Seuil (%)			
Sous bâtiment BUREAUX																					
Teneur limite avant contrôle de la saturation	mg/kg ms	4,3E+0	9,9E+0	5,8E+0	2,8E+2	3,6E+2	7,3E+1	5,8E+0	100%	198	4,9E+1	6,6E+1	PVL	PVL	3,8E+1	1,5E+1	PVL	PVL	1,5E+1	68%	2,6E+1
Teneur limite sol	mg/kg ms	4,3E+0	9,9E+0	5,8E+0	2,8E+2	PVL	7,3E+1	5,8E+0	74%	139	4,9E+1	6,6E+1	PVL	PVL	3,8E+1	PVL	PVL	PVL	3,8E+1	24%	4,8E+1
Sous bâtiment INDUSTRIEL / COMMERCIAL																					
Teneur limite avant contrôle de la saturation	mg/kg ms	1,2E+1	2,8E+1	1,6E+1	7,8E+2	1,0E+3	2,0E+2	1,6E+1	100%	554	1,4E+2	1,9E+2	PVL	PVL	1,1E+2	4,1E+1	PVL	PVL	4,1E+1	68%	7,4E+1
Teneur limite sol	mg/kg ms	1,2E+1	2,8E+1	1,6E+1	PVL	PVL	2,0E+2	1,6E+1	40%	54	1,4E+2	1,9E+2	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	1,4E+2	10%	1,7E+2
Zone récréative + habitations (ZAC), terres en ext. sous couverture terre végétale (30 cm)																					
Teneur limite avant contrôle de la saturation	mg/kg ms	2,6E+1	7,6E+1	1,1E+2	1,5E+3	2,0E+3	5,0E+2	1,1E+2	100%	1098	1,7E+3	3,9E+3	PVL	PVL	6,6E+2	6,0E+2	PVL	PVL	6,0E+2	68%	1,0E+3
Teneur limite	mg/kg ms	2,6E+1	7,6E+1	1,1E+2	PVL	PVL	PVL	1,1E+2	33%	95	1,7E+3	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	1,7E+3	4%	1,7E+3
Zone industrielle, terres sous TV ou parking, exposition employé en extérieur (mi-temps) et en intérieur																					
Teneur limite avant contrôle de la saturation	mg/kg ms	2,4E+2	7,1E+2	1,1E+3	1,4E+4	1,8E+4	4,6E+3	1,1E+3	100%	10243	1,6E+4	3,7E+4	PVL	PVL	6,1E+3	5,6E+3	PVL	PVL	5,6E+3	68%	9,3E+3
Teneur limite sol	mg/kg ms	2,4E+2	7,1E+2	PVL	PVL	PVL	PVL	7,1E+2	15%	669	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	0%	PVL

PVL: Pas de Valeur Limite

Tableau 3 : Teneurs limites obtenues pour les groupes d'hydrocarbures C5-C10 et C10-C40 suivant les différents modes d'extrapolation

4. PCB

Pour les PCB, en l'absence de teneur limite calculée pour la plupart des scénarios (et compte tenu des incertitudes importantes sur les valeurs d'entrée : cf. Annexe 3), le choix du groupe de travail s'est porté sur une valeur seuil correspondant à un bruit de fond urbain plutôt que sur une valeur « sanitaire ». Ce choix est en particulier cohérent avec la démarche de l'IEM pour la gestion des sols pollués, compte tenu que la réutilisation des terres excavées en zone d'aménagement est prévue essentiellement en milieu urbain (présentant un fond anthropique particulièrement marqué).

Une étude bibliographique complète des teneurs en bruit de fond des PCB dans les sols urbains n'a pas été menée dans le cadre de cette étude. Toutefois, très peu de travaux concernant les niveaux usuellement rencontrés dans les sols français ont été publiés (INERIS, 2010a et b). Aussi les sources consultées devraient-elles fournir un aperçu relativement complet des connaissances actuellement disponibles. Elles sont citées dans le Tableau 4 et les commentaires ci-dessous avec les informations collectées :

Pays	Zone géographique	Année	PCB	Concentrations (µg/kg sec)	Référence
France	Sites vallée Seine entre Rouen et la mer	2000	7 PCB	n.d. - 50	Motelay <i>et al.</i> , 2004
France	Sols de surface (0-5 cm), en zone agricole, sur l'ensemble du département de la Loire	2009	7 PCB	Moyenne : 2,1 90 ^e centile : 3,7	INERIS, 2010b
France	Grand Lyon	>2000-2011	7 PCB	Cf. Tableau 5	Grand Lyon, 2011
Enquêtes réalisées en Europe ou Grande-Bretagne		< 2003	7 PCB	Min - max : 0,026 - 96,9 Moyenne : 5,4	Meijer <i>et al.</i> , 2003
Canada	Région de Toronto Sols forestiers	2002	Σ10 PCB dont 7	0,8 - 58	Wong <i>et al.</i> , 2009

n.d. : non détecté.

Tableau 4 : Concentrations de bruit de fond en PCB dans les sols d'après la littérature

Type de bruit de fond	Nombre de résultats	Résultats (concentrations en 7PCB, en mg/kg sec)
Bruit de fond « naturel »	262, moins une aberrante (7,8 mg/kg)	- 169 < Id analytiques ³ . - 25 reportées égales à 0,00 (sans doute < Id). - reste : entre 0,01 et 0,1 (1 valeur).
Bruit de fond « avec apports » [d'origine naturelle ou anthropique]	396, moins une aberrante (35 mg/kg)	- Moyenne : 0,05 - Percentile 90 : 0,08 - Percentile 95 : 0,16

Id : limite de détection

Tableau 5 : Concentrations de bruit de fond en PCB dans les sols du Grand Lyon

- L'INERIS (2010b) retient 0,005 mg/kg comme valeur de référence pour des sols de surface en milieu rural.
- Motelai-Massei *et al.* (2004) ont analysé les 7 PCB (parmi d'autres) dans des sols de surface prélevés dans des parcs publics (1 mesure par ville), avec les résultats suivants selon les environnements⁴ :
 - urbain : Rouen : 1,49 µg/kg ;
 - banlieue : Bois-Guillaume : 0,09 µg/kg ; Harfleur : 21,5 µg/kg ;
 - zone « éloignés » [de sources ponctuelles] : Honfleur : 10,8 µg/kg .
- Les données du Grand Lyon proviennent d'une collecte systématique de données depuis plusieurs années sur le Grand Lyon (Grand Lyon, 2010).

Dans une optique opérationnelle, le 90^{ème} percentile du bruit de fond « avec apports » [d'origine naturelle ou anthropique] a été proposé par l'INERIS et retenu par le groupe de travail technique, puis arrondi à 0,1 mg/kg par le groupe de travail.

A noter que, dans le cadre de l'application du Guide de réutilisation des terres excavées, le critère supplémentaire de maintien de la qualité des sols sur le site receveur⁵ s'appliquera en outre pour les PCB comme pour les autres substances.

³ Id de 0,001 à 0,28 (1 seule valeur) mg/kg, la Id majoritaire étant 0,007 mg/kg (pour 154 valeurs).

⁴ Les résultats n.d. et 50 µg/kg correspondent à un site forestier et à un site industriel respectivement.

⁵ « La réutilisation de terres excavées sur un site receveur n'est possible que si les substances polluantes caractérisées au sein des terres présentent des teneurs inférieures à celles caractérisant le fond géochimique du site receveur. Un dépassement de 50 % des teneurs en polluants déjà présents sur le site receveur pourra être toléré pour un maximum de 5 composés dans la mesure où les autres critères sont respectés (notamment en ce qui concerne la préservation de la ressource en eau et des écosystèmes) » (Blanc *et al.*, 2012).

Cette valeur seuil de 0,1 mg/kg est inférieure au seuil d'acceptation en Installation de Stockage de Déchets Inertes de 1 mg/kg, seuil retenu pour l'acceptation en techniques routières (Setra, 2011). Le contexte d'usage (zone d'aménagement urbain vs. infrastructure routière) diffère également sensiblement.

5. INDICE PHENOL

Le groupe de travail technique « terres excavées » a souhaité élargir la valeur seuil calculée pour le phénol à l'indice phénol, plus couramment mesuré.

L'indice phénol mesure toutes les liaisons entre un noyau benzénique et un groupement OH. On retrouve ces liaisons notamment dans les familles chimiques suivantes :

- phénol, crésols (méthylphénols) ;
- alkylphénols plus lourds et biphényls, jusqu'aux octylphénols, nonylphénols, Bi-Phényl A (PBA), reconnus comme perturbateurs endocriniens ;
- chlorophénols : phyto-sanitaires très odorants, dont le pentachlorophénol, cancérigène probable selon l'US EPA ;
- nitrophénols ;
- certains HAP oxygénés.

Quantitativement, la mesure est calée sur le phénol pris comme étalon.

Pour ces familles, hormis le phénol lui-même et le crésol (ou tricrésol, mélange d'isomères), les 6 sources toxicologiques considérées (cf. Annexe 3) ne proposent pas de Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR) pour la voie inhalation⁶.

Pour le crésol, les deux VTR par inhalation disponibles (OEHHA, RIVM) sont supérieures (d'un facteur 30 et 7,5 respectivement) à celle retenue ici pour le phénol.

Par ailleurs, les alkylphénols s'avèrent -comme anticipé d'après le nombre de carbones- moins mobiles (volatils depuis un sol) que le phénol.

Compte tenu de ces éléments, et notamment du manque de VTR pour l'inhalation et des effets spécifiques possibles de certaines substances (cancérigènes, perturbateurs endocriniens), l'INERIS propose :

- de limiter l'élargissement de la valeur seuil du phénol, à travers l'indice phénol, aux seuls phénol et crésols ;
- de maintenir la même valeur du seuil, compte tenu du caractère plus toxique et mobile du phénol.

⁶ Recherche sur Furetox, moteur de recherche de données toxicologiques de référence (<http://www.furetox.fr>), en mai 2011.

Annexe 5 : Présentation des feuilles de calcul

ANNEXE 5 : Présentation des feuilles de calcul

SOMMAIRE

1. OBJET DE L'ANNEXE.....	2
2. VUE D'ENSEMBLE ET CAS PARTICULIERS.....	2
3. FEUILLE "VALEURS JALONS AIR"	4
4. FEUILLE "SUBSTANCES"	4
5. FEUILLE "SOLS"	4
6. FEUILLE "3PHAS"	4
7. FEUILLE "DU K"	5
8. FEUILLE "EMVAP-VOL"	5
9. FEUILLE "DISPERS"	6
10. FEUILLE "FEM"	6
11. FEUILLE "EXPORISK"	6
12. FEUILLE "RECAP1"	6
13. FEUILLE "SENSIBILITE"	7
14. FEUILLE "HCT1"	7
15. FEUILLE "HCT2"	7
16. FEUILLE "RECAP2"	7

1. OBJET DE L'ANNEXE

Le MEDDTL a chargé l'INERIS de mettre à disposition le fichier de calcul utilisé pour l'élaboration des valeurs seuils génériques de valorisation des terres excavées, afin d'assurer la transparence de cette élaboration et d'en faciliter une éventuelle adaptation à d'autres configurations de site ou à d'autres substances.

Dans cette optique, cette annexe présente les principales informations utiles à la compréhension du fonctionnement de ce fichier. Ce fichier de calcul est transmis dans une optique de transparence et de facilitation, mais ne prétend pas au statut d'outil optimisé en termes de convivialité, ni *a fortiori* d'outil incontournable. Un bureau d'étude disposant de ses propres feuilles de calcul pourra aisément y intégrer les quelques équations qui y manqueraient.

Après une vue d'ensemble, cette annexe présente successivement les différentes feuilles de calcul. On se référera aux annexes 1 à 4 pour la présentation des modèles, des données d'entrée, et de l'obtention des valeurs seuils.

2. VUE D'ENSEMBLE ET CAS PARTICULIERS

Pour la transparence de la modélisation des transferts, des expositions et des risques, on a découpé cette modélisation en modules correspondant aux différents transferts entre milieux, et par extension -et abus de langage- jusqu'au niveau de risque. Chaque module est caractérisé par un coefficient de transfert CT égal au rapport des concentrations entre le milieu d'arrivée et le milieu de départ¹ :

$$\text{Equation 1} \quad CT_{a \rightarrow b} = \frac{\text{concentration dans le milieu b}}{\text{concentration dans le milieu a}}$$

Les transferts successifs, les niveaux de risque et les teneurs limites *in fine*, sont calculés à travers des multiplications successives de ces coefficients de transfert.

Ces coefficients de transfert constituent donc l'indicateur clé à suivre dans les feuilles de calcul. Ils sont souvent mis en exergue par un surlignage jaune (gris à l'impression noir et blanc).

Outre leur fonction calculatoire, ils facilitent grandement le contrôle de la cohérence de la modélisation, car ils permettent d'apprécier rapidement :

- les différences de comportement entre polluants : on peut reboucler, par regard d'expert ou par des petits calculs de contrôle, avec les propriétés des polluants et le comportement attendu en conséquence ;
- les différences de "comportement" entre scénarios et variantes de modélisation, au besoin par le calcul de ratios de coefficients de transfert. Ces calculs de ratio ne seront pas systématiquement signalés ici.

¹ La concentration étant parfois remplacée par un flux (émission de vapeurs à la surface du sol) ou un niveau de risque (pour le transfert à l'homme et l'évaluation du risque).

Les feuilles de calcul affichent également les teneurs dans les différents milieux et les risques associés. Dans le cadre d'une application sur site, outre le calcul des risques, cela facilite :

- le rebouclage avec les mesures de terrain dans ces milieux ;
- le court-circuitage éventuel d'une partie amont de la modélisation, par introduction de résultats de mesures dans des milieux intermédiaires ;
- le regard sur les ordres de grandeur aux différentes étapes du modèle.

Les feuilles de calcul comportent, souvent en lignes et colonnes masquées, des modélisations alternatives (scénarios, modèles) et des substances supplémentaires non reprises dans les valeurs seuils, maintenues à titre de comparaison dans l'optique du contrôle de la cohérence des résultats. Les lignes correspondant à des modélisations alternatives sont signalées par des cases grisées dans la colonne "paramètre". La documentation et la présentation de ces compléments peuvent être moins complètes que pour les scénarios et substances non repris dans les valeurs seuils. Ces développements ne sont pas décrits ou commentés ici. De même, certaines colonnes (de substances) sont répétées pour permettre d'observer simplement l'impact de variations de scénarios (par ex. profondeur de la source).

Pour le mercure métallique Hg⁰, faute de relation entre la concentration dans le sol et la concentration dans l'air du sol, des adaptations spécifiques des formules (signalées par des cases en bleu) ont été effectuées, avec notamment une recherche manuelle de la teneur limite dans le sol aboutissant au niveau de risque limite fixé.

Les calculs des scénarios (en ligne) appellent généralement des données sur la même feuille de calcul et sur d'autres feuilles de calcul. Pour sécuriser la création de nouveau scénario, on peut recommander la pratique suivante de copie puis adaptation d'un scénario préexistant :

1. Insérer en dessous du scénario à copier un nombre de lignes n correspondant à la taille du calcul du scénario à copier et adapter.
2. Copier le scénario de départ dans les lignes ainsi insérées.
3. Insérer juste au dessus du scénario copié le même nombre de lignes n.
4. Copier le scénario déjà copié dans les lignes ainsi insérées, avec le même décalage vers le haut que vers le bas lors de la copie du scénario de départ : on obtient une copie conforme du scénario de départ, avec les liens sur les mêmes lignes, sans décalage.
5. Supprimer la première copie.
6. Déplacer la copie conforme du scénario de départ à l'endroit choisi.
7. Adapter la copie conforme au nouveau scénario voulu, *a priori* par :
 - des remplacements sur lignes entières de numéros de lignes appelées dans les formules ;
 - ou des modifications de formules sur la première colonne puis copie des formules sur les autres colonnes.
 - des changements de signalisation du scénario (titre, couleur,...).

8. Ajouter (et analyser) un contrôle de cohérence, typiquement *via* un ratio entre coefficients de transferts.

3. FEUILLE "VALEURS JALONS AIR"

Il s'agit de la feuille des valeurs repères dans l'air utilisées en mai 2011 pour les « diagnostics dans les établissements accueillant du public » (BRGM, 2010 ; la mise à jour de début 2012 n'est donc pas intégrée).

4. FEUILLE "SUBSTANCES"

Cette feuille affiche les valeurs d'entrée des paramètres physico-chimiques et toxicologiques des substances, et les sources associées, correspondant à l'Annexe 3.

Elle convertit les unités de certains paramètres, et calcule également des paramètres d'information, tels que la concentration de saturation dans l'air.

5. FEUILLE "SOLS"

Cette feuille affiche les valeurs d'entrée des paramètres des sols, et les sources associées, correspondant à une partie de l'Annexe 2. Elle convertit et calcule de certains paramètres, comme la perméabilité à l'air.

C'est dans cette feuille que se rentrent les épaisseurs des différentes couches de sol ou matériaux.

Différents sols ou matériaux sont renseignés (en lignes masquées) bien que n'intervenant pas dans la modélisation effectuée ici.

6. FEUILLE "3PHAS"

Cette feuille effectue les calculs de l'équilibre multiphase au niveau du sol source. Elle reprend les valeurs des paramètres concernés du sol source (feuille "Sols") et des substances (feuille "Substances"). Elle indique si le l'équilibre multiphase est saturé, et écrête le cas échéant la concentration calculée dans l'eau et l'air du sol.

C'est dans cette feuille qu'est entrée la concentration en polluant dans le sol source.

La concentration en polluant dans le sol a été fixée ici à un niveau très faible pour s'affranchir de tout effet de saturation de l'équilibre multiphase (sauf pour le cas spécifique du mercure métallique : cf. corps de texte, § 4). Ce choix n'est pas nécessaire pour le calcul de teneurs limites, qui est effectué uniquement via les

coefficients de transfert (avec contrôle de la saturation sur les teneurs limites obtenues) : la concentration en polluant dans le sol peut être fixée à n'importe quel niveau, arbitrairement (*i.e.* les teneurs limites calculées n'en dépendent pas), sauf pour le mercure.

(En marge sont produites des données non reprises dans le calcul final des teneurs limites (signalées par un remplissage en gris des deux premières colonnes) :

- une concentration limite dans le sol pour une concentration limite donnée dans l'air du sol inférieure, en l'occurrence un seuil olfactif ;
- des données de sensibilité des résultats à la fraction de carbone organique dans le sol, (foc).

7. FEUILLE "DU K"

Cette feuille effectue les calculs de diffusivité effective (DU) au niveau des différentes couches de sol, et de diffusivité et perméabilité totale DU_{tot} dans un sol multicouche.

Cette feuille n'est pas optimisée en tant qu'outil, dans le sens qu'elle ne reprend pas systématiquement tous les sols et matériaux introduits dans la feuille "Sols" : les appels de donnée (liens) vers le descriptif de la feuille "Sols" sont entrés manuellement.

8. FEUILLE "EMVAP-VOL"

Cette feuille calcule l'émission d'air du sol et de vapeurs de polluants à la surface du sol ou de la dalle. Elle utilise les formules du modèle CSOIL/VOLASOIL adapté.

Les différentes configurations de site sont signalées par des colorations différentes en première colonne, et par des titres particulièrement marquées. Les différentes variantes de modélisation et durées de moyennation de l'émission (selon les VTR et les durées d'exposition considérées, pour la modélisation en source finie), donnent lieu à de nombreuses sous-parties et sous-titres et ratios de contrôle.

La lecture de cette feuille requiert donc une concentration particulière. On a veillé à en harmoniser la mise en forme des différents niveaux, mais quelques imperfections peuvent subsister.

9. FEUILLE "DISPERS"

Cette feuille effectue les calculs de dispersion, dans l'air intérieur ou extérieur, des vapeurs émises.

Elle intègre donc des paramètres des personnes (hauteur de respiration), du vent, et des bâtiments (hauteur, taux de ventilation).

Cette feuille comporte en ligne masquée le modèle de dispersion en extérieur SOILRISK de CSOIL (van den Berg, 1994), qui prend en compte la "rugosité" du terrain. Il peut être particulièrement utile pour des grandes zones d'émission (où l'accumulation dans la boîte du modèle retenu devient excessive) et pour des expositions en aval éolien de la zone d'exposition.

10. FEUILLE "FEM"

Cette feuille reçoit les durées et fréquences d'exposition des personnes et les convertit en fréquences standardisées moyennes sur les durées considérées.

Elle reprend en outre des données de ventilation des bâtiments à des fins de report dans l'Annexe 2.

11. FEUILLE "EXPORISK"

Cette feuille intègre les résultats des trois feuilles précédentes pour calculer l'exposition et le risque, et les teneurs limites calculées. Elle appelle donc les VTR de la feuille "Substances", et la concentration de saturation de l'équilibre multiphase dans le sol source depuis la feuille "3Phas" (pour le contrôle de cette saturation sur la teneur limite et éventuellement l'écrêtage associé).

Elle présente de nombreux cas de scénarios d'usage, de variantes de modélisation et de durées de moyennation de l'émission, qui sont formatés comme dans la feuille "EmVap-Vol".

12. FEUILLE "RECAP1"

Cette feuille récapitule les teneurs limites calculées des différents scénarios évalués, en les extrayant de la feuille "ExpoRisk".

(En dessous de ce récapitulatif, certains de ces résultats sont reportés en tant que valeurs, et comparés sous forme de ratios aux résultats (sous forme de formules) du récapitulatif. Ces lignes aident à vérifier les impacts éventuels de modifications en amont).

13. FEUILLE "SENSIBILITE"

Dans le cadre de l'étude de sensibilité, cette feuille récapitule des épaisseurs de source épuisée et teneurs limites calculées selon différentes modélisations:

- Différentes valeurs de la fraction de carbone organique (foc) et de la perméabilité du sol, par l'opération manuelle suivante :
 - modifications successives des valeurs dans la feuille "Sols" ;
 - copier-coller successifs en tant que valeurs des résultats obtenus.
- Différentes variantes du modèle d'émission, en les extrayant des feuilles "EmVap-Vol" et "ExpoRisk".

14. FEUILLE "HCT1"

Cette feuille reçoit les concentrations en hydrocarbures individuels des mélanges de référence envisagés (essence, fuel, gasoil), et établit les proportions des différentes coupes d'hydrocarbures dans leurs groupes respectifs (C5-C10 et C10-C40 ; cf. Annexe 4).

15. FEUILLE "HCT2"

Dans cette feuille, les teneurs limites des différentes coupes des hydrocarbures sont reprises de la feuille "Récap1" et extrapolées et agrégées sous forme de seuils C5-C10 et C10-C40 (cf. Annexe 4). Cette feuille appelle donc, depuis la feuille "HCT1", les proportions des différentes coupes dans leurs groupes respectifs (C5-C10 et C10-C40).

16. FEUILLE "RECAP2"

Cette feuille récapitule les seuils élaborés pour les différents scénarios évalués et substances et groupes de substances retenus *in fine* :

- en les extrayant des feuilles "ExpoRisk" et "HCT2" ;
- par introduction manuelle du bruit de fond urbain retenu pour les 7 PCB.