

ANNEXE B2 : EQUATIONS DE CSOIL ET VOLASOIL POUR LE CALCUL DES DOSES D'EXPOSITION



Table des matières

B2-1. CALCULS PREALABLES ET CALCUL DES CONCENTRATIONS ET DOSES D'EXPOSITION INDIVIDUELLES VIA RISC HUMAN® V. 3.3 (CSOIL)	119
B2-1.1 DISTRIBUTION DE LA SUBSTANCE ENTRE LES DIFFERENTES PHASES DU SOL	119
B2-1.1.1 <i>Fugacité</i>	119
B2-1.1.2 <i>Bilan de masse</i>	120
B2-1.1.3 <i>Concentration dans la solution du sol</i>	121
B2-1.1.4 <i>Concentration dans l'air du sol</i>	122
B2-1.2 CONCENTRATIONS DANS L'AIR : EVAPORATION A PARTIR DU SOL	123
B2-1.2.1 <i>Coefficient de diffusion</i>	123
B2-1.2.2 <i>Flux</i>	124
B2-1.2.3 <i>Dilution dans l'air extérieur</i>	127
B2-1.2.4 <i>Concentration dans l'air extérieur</i>	128
B2-1.2.5 <i>Concentration dans l'air intérieur</i>	128
B2-1.3 CONCENTRATIONS DANS L'EAU DE BOISSON	130
B2-1.3.1 <i>Perméation à travers les conduites de distribution</i>	130
B2-1.3.2 <i>Concentration dans l'eau de boisson</i>	131
B2-1.3.3 <i>Concentration dans l'air de la salle de bains</i>	131
B2-1.4 CONCENTRATIONS DANS LES PLANTES POTAGERES	132
B2-1.4.1 <i>Facteurs de bioconcentration</i>	132
B2-1.4.2 <i>Concentration dans les plantes</i>	135
B2-1.5 CONCENTRATIONS DANS LA VIANDE ET LE LAIT	136
B2-1.6 AUTRES VOIES D'EXPOSITION	140
B2-1.7 CALCUL DES DOSES INDIVIDUELLES (PAR VOIE D'EXPOSITION)	140
B2-1.7.1 <i>Répartition du temps ou durée d'exposition</i>	140
B2-1.7.2 <i>Ingestion de sol</i>	145
B2-1.7.3 <i>Ingestion de végétaux</i>	146
B2-1.7.4 <i>Ingestion d'eau de boisson</i>	147
B2-1.7.5 <i>Contact dermique avec le sol et les poussières de sol</i>	148
B2-1.7.6 <i>Contact dermique avec l'eau durant la douche</i>	149
B2-1.7.7 <i>Inhalation de sol et de poussières de sol</i>	150
B2-1.7.8 <i>Inhalation d'air intérieur</i>	151
B2-1.7.9 <i>Inhalation d'air extérieur</i>	151
B2-1.7.10 <i>Inhalation de vapeurs durant la douche</i>	152
B2-2 CALCUL DES DOSES D'EXPOSITION PAR INHALATION DE PRODUITS VOLATILS VIA RISC HUMAN® V. 3.3 (VOLASOIL)	153
B2-2.1 HYPOTHESES ET FLUX CONSIDERES DANS VOLASOIL	153
B2-2.2 CAS A : POLLUTION DE L'EAU SOUTERRAINE, SYSTEME PARFAITEMENT MELANGE.....	155
B2-2.3 CAS B : EAU SOUTERRAINE POLLUEE DANS LE VIDE VENTILE	156
B2-2.4 CAS C : PRESENCE D'UNE COUCHE SURNAGEANTE (LNAPL).....	157
B2-2.5 CAS D : EAU SOUTERRAINE POLLUEE DANS LE VIDE VENTILE ET PRESENCE D'UNE COUCHE SURNAGEANTE.....	158
B2-2.6 CAS E : PRESENCE DE PRODUIT PUR DANS LA ZONE VADOSE.....	159
B2-2.7 CAS F : POLLUTION D'UNE NAPPE PROFONDE	160

B2-2.8 CAS G : PRESENCE D'UNE PHASE LIQUIDE NON AQUEUSE PLONGEANTE (DNAPL), SYSTEME PARFAITEMENT MELANGE	161
B2-2.9 CAS H : SOURCE DE POLLUTION SITUEE EN DESSOUS DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE, SYSTEME NON PARFAITEMENT MELANGE	162
B2-3 REFERENCES	164

B2-1. Calculs préalables et calcul des concentrations et doses d'exposition individuelles via RISC Human[®] v. 3.3 (CSOIL)

Les calculs présentés dans cette section sont intégralement repris de RISC Human v. 3.3 (© Van Hall Instituut, 2007). Ils sont organisés par thème. Les scénarios standards auxquels ces calculs font référence sont détaillés dans l'Annexe B3.

B2-1.1 Distribution de la substance entre les différentes phases du sol

Le calcul de la distribution d'une substance entre les différentes phases du sol (eau du sol, air du sol et sol) s'effectue selon le principe de fugacité. La fugacité d'une substance dans un milieu est la tendance qu'à cette substance à s'échapper du milieu.

B2-1.1.1 Fugacité

Les constantes de fugacité de l'eau du sol, de l'air du sol et du sol décrivent leur capacité respective à contenir une substance chimique, en tenant compte d'un équilibre physico-chimique entre ces trois phases du sol. Les constantes de fugacité sont utilisées dans le calcul de la distribution de la substance entre les trois phases. Le quotient des constantes de fugacité est égal au quotient des concentrations dans les trois phases lorsque l'équilibre physico-chimique est atteint.

$$Z_a = 1 / (R_{gas} * T_{soil})$$

$$Z_w = S / (V_p * M)$$

$$Z_s = K_p * Bulk * Z_w / V_s$$

$$\text{En principe } V_a + V_w < 1$$

$$\text{alors } V_s = 1 - V_a - V_w$$

$$\text{Si } K_{lw} \text{ existe dans la littérature alors } K_{lw} = K_{lw} * f_{nd}$$

$$\text{sinon } K_{lw} = V_p * M * f_{nd} / (S * R_{gas} * T_{soil}) = Z_a / Z_w$$

Z _a	Constante de fugacité de l'air du sol	mol.m ⁻³ .Pa ⁻¹
Z _w	Constante de fugacité de la solution du sol	mol.m ⁻³ .Pa ⁻¹
Z _s	Constante de fugacité du sol	mol.m ⁻³ .Pa ⁻¹
R _{gas}	Constante des gaz parfaits	Pa.m ³ .mol ⁻¹ .K ⁻¹
T _{soil}	Température du sol	K
S	Solubilité dans l'eau	mg.l ⁻¹
V _p	Pression de vapeur à 10 °C	Pa
M	Masse moléculaire	g.mol ⁻¹
f _{nd}	Fraction non dissociée de la substance	-
K _p	Coefficient de partition sol-solution	(mol.kg ⁻¹ sol sec) / (mol.dm ⁻³)
Bulk	Densité apparente à l'état sec	kg.dm ⁻³
V _s	Fraction solide du sol	-
OS	Taux de matière organique dans le sol	%
V _a	Fraction d'air dans le sol	-
V _w	Fraction d'eau dans le sol	-
K _{lw}	Coefficient de partition air-eau ou constante adimensionnelle de Henry	-

Coefficient de partition sol-solution du sol pour les métaux, métalloïdes et autres substances inorganiques



Le coefficient de partition sol-solution du sol pour les métaux, métalloïdes et autres substances inorganiques est directement introduit.

$$K_p = K_d$$

Coefficient de partition sol-solution du sol pour les substances organiques

Les substances organiques sont adsorbées par la matière organique du sol. Le coefficient de partition sol-solution dépend dès lors du taux de carbone organique contenu dans le sol. Le coefficient de partition carbone organique-eau et le taux de carbone organique du sol sont utilisés pour calculer le coefficient de partition sol-solution. Lorsqu'une substance organique (considérée comme un acide faible) est susceptible de se dissocier dans les sols acides, le coefficient de partition sol-solution dépend de la fraction non dissociée de la substance.

$$K_p = K_{oc} * f_{oc} * f_{nd}$$

Si la substance possède un pKa, alors $f_{nd} = 1 / (1 + 10^{(pH - pKa)})$

sinon $f_{nd} = 1$

S'il existe un log(Koc) dans la littérature, alors $K_{oc} = 10^{(LogKoc)}$

sinon $K_{oc} = 0,411 * 10^{(LogKow)}$

Kp	Coefficient de partition sol-solution	(mol.kg ⁻¹ sol sec) / (mol.dm ⁻³)
Koc	Coefficient de partition carbone organique-solution	(mol.kg ⁻¹ sol sec) / (mol.dm ⁻³)
foc	Fraction de carbone organique	-
fnd	Fraction non dissociée de la substance	-
pKa	Constante de dissociation acide	-
pH	Acidité	-
Kow	Coefficient de partition octanol-solution	-
Kd	Coefficient de partition sol-solution	(mol.kg ⁻¹ sol sec) / (mol.dm ⁻³)

B2-1.1.2 Bilan de masse

Le bilan de masse d'une substance dans les phases du sol est réalisé en supposant l'équilibre entre les différentes phases. Il est calculé à partir des fractions de volume qu'occupent les différentes phases dans le sol et des constantes de fugacité déterminées par les équations de la théorie de la fugacité (Mackay *et al.*, 1985).

Substances organiques :

$$P_a = (Z_a * V_a) / (Z_a * V_a + Z_w * V_w + Z_s * V_s)$$

$$P_w = (Z_w * V_w) / (Z_a * V_a + Z_w * V_w + Z_s * V_s)$$

$$P_s = (Z_s * V_s) / (Z_a * V_a + Z_w * V_w + Z_s * V_s)$$

Métaux et métalloïdes :

$$P_w = V_w / (V_w + K_p * Bulk)$$

$$P_a = 0$$

$$P_s = 1 - P_w$$

Substances inorganiques :

$$P_w = 1$$

$$P_a = 0$$

Pa	Fraction massique de la substance dans l'air	-
Pw	Fraction massique de la substance dans l'eau	-
Ps	Fraction massique de la substance dans le sol	-

B2-1.1.3 Concentration dans la solution du sol

Dans l'hypothèse de l'équilibre physico-chimique de la substance entre les différentes phases du sol et du bilan de masse, la concentration dans la solution du sol est calculée en utilisant la fraction massique de la substance dans l'eau, les paramètres physico-chimiques de la substance et les paramètres du sol. Lorsque la concentration calculée dans la solution du sol dépasse la valeur de la solubilité dans l'eau de la substance, elle est corrigée de sorte qu'elle soit au maximum égale à cette solubilité (phase de contrôle de la solubilité dans l'eau).

Cette condition n'est cependant pas appliquée aux produits pétroliers dont la solubilité est très faible.

Une attention toute particulière doit néanmoins être apportée lorsqu'on détecte une présence simultanée de substances de la même famille dans l'eau ou de solvants susceptibles d'augmenter la solubilité d'une substance dans l'eau. Dans ce cas, il peut être prudent de ne pas limiter la concentration dans l'eau à la solubilité théorique de la substance afin de ne pas sous-estimer les risques.

Toutes substances :

$$C_{s,max} = (S * M * V_w) / (Bulk * P_w)$$

S'il s'agit d'un jardin ou d'une surface cultivée :

S'il existe $C_{s,g}$ alors $C_{s,g}$ est introduit

$$\text{sinon, s'il existe } C_{gw,g}, \text{ alors } C_{s,g} = (C_{gw,g} * 0,001 * V_w) / (Bulk * P_w)$$

Sinon, s'il s'agit d'une surface nue :

S'il existe $C_{s,o}$ alors $C_{s,g} = C_{s,o}$

$$\text{sinon, s'il existe } C_{gw,o}, \text{ alors } C_{s,g} = (C_{gw,o} * 0,001 * V_w) / (Bulk * P_w)$$

sinon, s'il existe C_s , alors $C_{s,g} = C_s$

$$\text{sinon, s'il existe } C_{gw}, \text{ alors } C_{s,g} = (C_{gw} * 0,001 * V_w) / (Bulk * P_w)$$

$$C_{pw,g} = (C_{s,g} * 1000 * Bulk * P_w) / V_w$$

S'il s'agit d'une surface nue :

S'il existe $C_{s,o}$ alors $C_{s,o}$ est introduit

$$\text{sinon, s'il existe } C_{gw,o}, \text{ alors } C_{s,o} = (C_{gw,o} * 0,001 * V_w) / (Bulk * P_w)$$

sinon, s'il existe C_s , alors $C_{s,o} = C_s$

$$\text{sinon, s'il existe } C_{gw}, \text{ alors } C_{s,o} = (C_{gw} * 0,001 * V_w) / (Bulk * P_w)$$

$$C_{pw,o} = (C_{s,o} * 1000 * Bulk * P_w) / V_w$$

S'il s'agit d'une surface bâtie :

S'il existe $C_{s,b}$, alors $C_{s,b}$ est introduit

$$\text{sinon, s'il existe } C_{gw,b}, \text{ alors } C_{s,b} = (C_{gw,b} * 0,001 * V_w) / (Bulk * P_w)$$

sinon s'il existe C_s , alors $C_{s,b} = C_s$

$$\text{sinon s'il existe } C_{gw}, \text{ alors } C_{s,b} = (C_{gw} * 0,001 * V_w) / (Bulk * P_w)$$

$$C_{pw,b} = (C_{s,b} * 1000 * Bulk * P_w) / V_w$$

S'il s'agit du site :

S'il existe C_s , alors C_s est introduit

$$\text{sinon, s'il existe } C_{gw}, \text{ alors } C_s = (C_{gw} * 0,001 * V_w) / (Bulk * P_w)$$

$$C_{pw} = (C_s * 1000 * Bulk * P_w) / V_w$$

Contrôle sur la limite de solubilité :

Si $C_s * Bulk * P_w / V_w > S$, alors $C_{pw} = S * 1000$

Si $C_{s,g} * Bulk * P_w / V_w > S$, alors $C_{pw,g} = S * 1000$

Si $C_{s,o} * Bulk * P_w / V_w > S$, alors $C_{pw,o} = S * 1000$

Si $C_{s,b} * Bulk * P_w / V_w > S$, alors $C_{pw,b} = S * 1000$

Si le module VOLASOIL est utilisé, alors C_{gw} doit être introduit :

$C_{s,max}$	Concentration maximale dans le sol (si calculée à partir de la concentration dans l'eau souterraine)	$mg.kg^{-1}$ sol sec
$C_{s,g}$	Concentration dans le sol (jardin et surface cultivée)	$mg.kg^{-1}$ sol sec
$C_{s,o}$	Concentration dans le sol (surface nue)	$mg.kg^{-1}$ sol sec
C_s	Concentration dans le sol (site)	$mg.kg^{-1}$ sol sec
$C_{s,b}$	Concentration dans le sol (surface bâtie)	$mg.kg^{-1}$ sol sec
$C_{gw,g}$	Concentration dans l'eau souterraine (jardin et surface cultivée)	$\mu g.l^{-1}$
$C_{gw,o}$	Concentration dans l'eau souterraine (surface nue)	$\mu g.l^{-1}$
C_{gw}	Concentration dans l'eau souterraine	$\mu g.l^{-1}$
$C_{gw,b}$	Concentration dans l'eau souterraine (surface bâtie)	$\mu g.l^{-1}$
$C_{pw,g}$	Concentration dans l'eau porale (jardin et surface cultivée)	$\mu g.l^{-1}$
$C_{pw,o}$	Concentration dans l'eau porale (surface nue)	$\mu g.l^{-1}$
$C_{pw,b}$	Concentration dans l'eau porale (surface bâtie)	$\mu g.l^{-1}$
C_{pw}	Concentration dans l'eau porale	$\mu g.l^{-1}$

B2-1.1.4 Concentration dans l'air du sol

Dans l'hypothèse de l'équilibre physico-chimique de la substance entre les différentes phases du sol et du bilan de masse, la concentration dans l'air du sol est calculée à partir de la fraction massique de la substance dans l'air du sol, des paramètres du sol et de la concentration de l'eau porale. Le quotient entre les concentrations dans l'eau porale et l'eau du sol est égal au coefficient de partition eau-air.

Substances organiques :

S'il s'agit d'une surface nue et qu'il existe $C_{s,o}$ alors $C_{s,o}$ est introduit

$$\text{sinon } C_{s,o} = (C_{pw,o} * 1000 * V_w * P_a) / (P_w * V_a)$$

S'il s'agit d'une surface bâtie et qu'il existe $C_{s,b}$ alors $C_{s,b}$ est introduit, sinon

Si le module CSOIL est utilisé, $C_{s,b} = (C_{pw,b} * 1000 * V_w * P_a) / (P_w * V_a)$

Sinon (module VOLASOIL utilisé), alors

Cas A, Cas G : $C_{s,b} = K_{lw} * C_{gw,b} * 1000$

Cas B : $C_{s,b} = 0$

Cas C ou Cas E : $V_d = (V_p * 1E+6 * M) / (R_{gas} * T_{soil})$; $C_{s,b} = V_d$

Cas D : $V_d = (V_p * 1E+6 * M) / (R_{gas} * T_{soil})$; $C_{s,b} = 0$

Cas F : $C_{s,b}$ doit être introduit

Métaux, métalloïdes et autres substances inorganiques :

Csa,o = 0 ; Csa,b = 0

Csa,o	Concentration dans l'air du sol (surface nue)	$\mu\text{g.m}^{-3}$
Csa,b	Concentration dans l'air du sol (surface bâtie)	$\mu\text{g.m}^{-3}$
Cas A	Pollution de l'eau souterraine (milieu bien mélangé)	-
Cas B	Eau souterraine polluée présente dans le vide ventilé	-
Cas C	Couche flottante dans le sol	-
Cas D	Couche flottante au-dessus de l'eau souterraine présente dans le vide ventilé	-
Cas E	Produit en phase libre dans la zone insaturée du sol	-
Cas F	Eau souterraine polluée très profonde	-
Cas G	Couche de produit plongeant (milieu bien mélangé)	-
Vd	Densité de vapeur	$\mu\text{g.m}^{-3}$

B2-1.2 Concentrations dans l'air : évaporation à partir du sol*B2-1.2.1 Coefficient de diffusion*

Le coefficient de diffusion dans l'eau et dans l'air peut être calculé via la masse moléculaire. Wolff et van der Heide (1982) décrivent une méthode pour estimer le coefficient de diffusion dans l'eau et dans l'air, basée sur la masse moléculaire de la substance.

Le coefficient de diffusion dans l'eau et dans l'air est converti en coefficient de diffusion respectivement dans la phase aqueuse et la phase gazeuse du sol par les équations de Millington-Quirk (Jury et al., 1983). Le coefficient de diffusion dans la phase aqueuse et dans la phase gazeuse du sol est fonction de la longueur du trajet diffusif dans le sol. La longueur du trajet diffusif dans une phase du sol dépend de la fraction volumique qu'occupe la phase dans le sol et de la porosité du sol.

La diffusion totale dans le sol résulte de la diffusion dans l'air du sol et dans l'eau porale. Le coefficient de diffusion dans le sol est calculé en considérant les coefficients de diffusion dans l'air du sol et l'eau porale, corrigés pour les fractions massiques et volumiques occupées par ces deux phases.

Le coefficient de diffusion dans la phase gazeuse d'un béton se calcule de la même manière que le coefficient de diffusion dans la phase gazeuse du sol.

Substances organiques :

Si D_a n'existe pas dans la littérature, alors $D_a = 0,036 * (76/M)^{1/2}$
sinon D_a est introduit dans les paramètres physico-chimiques

Si D_w n'existe pas dans la littérature, alors $D_w = 3,6 E-6 * (76/M)^{1/2}$
sinon D_w est introduit dans les paramètres physico-chimiques

$$D_{sa} = V_a^{10/3} * D_a / ((1-V_s)^2)$$

$$D_{sa,c} = V_{a,c}^{10/3} * D_a / ((1-V_{s,c})^2)$$

$$D_{sw} = V_w^{10/3} * D_w / ((1-V_s)^2)$$

$$D_u = (P_a * D_{sa}/V_a) + (P_w * D_{sw}/V_w)$$

Métaux, métalloïdes et autres substances inorganiques :

$$D_{sa} = 0$$

$$D_{sa,c} = 0$$

$$D_{sw} = 0$$

$$D_u = 0$$

Da	Coefficient de diffusion dans l'air	$m^2.h^{-1}$
Dw	Coefficient de diffusion dans l'eau	$m^2.h^{-1}$
Dsa	Coefficient de diffusion dans l'air du sol	$m^2.h^{-1}$
Dsa,c	Coefficient de diffusion dans la phase gazeuse du béton	$m^2.h^{-1}$
Va,c	Fraction volumique d'air dans le béton	-
Vs,c	Fraction volumique solide du béton	-
Dsw	Coefficient de diffusion dans l'eau porale	$m^2.h^{-1}$
Du	Coefficient de diffusion dans le sol	$m^2.h^{-1}$

B2-1.2.2 Flux

Le **flux modélisé** correspond à la somme du flux de diffusion (dans l'air du sol et dans l'eau porale) au niveau de la surface du sol (ou du vide ventilé) et du flux d'évaporation de l'eau, en tenant compte des limites imposées dans les différents milieux traversés. A noter que le modèle CSOIL ne prend pas en compte le phénomène de convection en phase gazeuse.

Le modèle de flux considère une couche d'air stagnant entre la surface du sol et l'air libre comme le facteur restrictif du flux issu du sol. Le flux de diffusion maximal à travers cette couche limite dépend de l'épaisseur de cette couche, du coefficient de diffusion dans l'air libre et de la concentration de la substance dans l'air du sol. Le modèle CSOIL se base sur une épaisseur constante de la couche limite, calculée à partir des taux d'évaporation de l'eau en formulant l'hypothèse que la substance sous forme gazeuse se comporte comme la vapeur d'eau (Jury *et al.*, 1984).

Le flux dans la couche d'air stagnant est appelé **flux dans la couche limite**. Si le **flux global** (somme du flux de diffusion dans l'air du sol et dans l'eau porale et du flux d'évaporation de l'eau) calculé est plus grand que le flux maximal au travers de la couche limite, alors ce flux correspond au flux de diffusion au travers de la couche limite.

Les **diffusions dans l'air du sol et dans l'eau porale** contribuent toutes les deux à la diffusion totale dans le sol. En général, la diffusion via la phase gazeuse est la plus importante. Le modèle calcule le flux de diffusion en utilisant les lois de Fick, assurant un gradient linéaire au sein du sol. La linéarité du gradient augmente avec l'âge des pollutions (Kliest, 1990). Le gradient de concentration, la longueur du trajet diffusif et le coefficient de diffusion sont utilisés pour calculer la diffusion totale dans le sol. Il est supposé que la concentration maximale de la pollution se situe à la profondeur de pollution introduite dans le modèle, alors que la concentration à la surface du sol ou dans le vide ventilé est négligeable (nulle).

Le **flux d'évaporation d'eau** est le flux de substance du au transport convectif de la phase aqueuse dans le sol. L'eau qui s'évapore à la surface du sol est alimentée en substances dissoutes par le sol et l'eau souterraine. La quantité de substance qui s'évapore dépend de la concentration : plus la concentration est élevée, plus l'évaporation est importante. La quantité d'eau renouvelée (égale au flux d'évaporation de l'eau) détermine la quantité de substance susceptible de s'évaporer, de sorte que le renouvellement est la source de la pollution dans l'eau porale.

Le flux à travers le béton dépend de la diffusion dans l'air et dans l'air contenu dans le béton, de la concentration dans l'air du sol, de l'épaisseur du béton (plancher et/ou mur) et de la distance existant entre la source de pollution et le béton.

La Figure 1 positionne schématiquement ces différents flux.

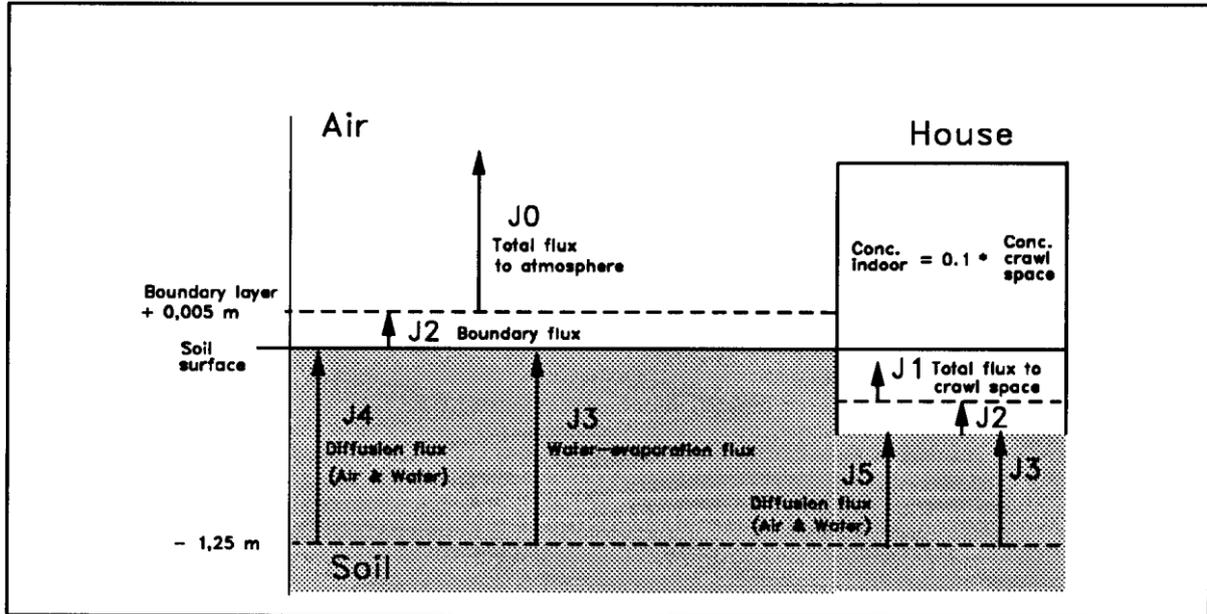


Figure 1 – Schématisation des flux de transport de composés volatils du sol vers l'air ambiant et du sol vers l'intérieur d'une maison

Substances organiques :

$$J1 = ((D_{sa} * D_{sa,c} * C_{sa,b} * 1E-6) / (D_{p,o} * d_c)) / ((D_{sa} / D_{p,o}) + (D_{sa,c} / d_c))$$

$$J2b = (D_a * C_{sa,b} * 1E-6) / d$$

$$J2o = (D_a * C_{sa,o} * 1E-6) / d$$

$$J3b = C_{pw,b} * 0,001 * E_v / 24$$

$$J3o = C_{pw,o} * 0,001 * E_v / 24$$

Si $C_{pw,b} > S * 1000$, alors $J4b = D_u * S * V_w / ((D_{p,o} - H_e) * P_w)$

sinon $J4b = D_u * C_{s,b} * Bulk / (D_{p,o} - H_e)$

	<p>Erreur dans le logiciel RISC Human[®] v3.3 :</p>
	<p>Dans le logiciel RISC Human[®] v3.3, le flux J4b est calculé selon la relation suivante :</p>
	$J4b = D_u * S * V_w / (D_{p,o} - H_e * P_w)$
	<p>La relation exacte est la suivante :</p>
	$J4b = D_u * S * V_w / ((D_{p,o} - H_e) * P_w)$
	<p>Afin de contourner cette erreur et étant donné l'impossibilité d'introduire des valeurs de flux, l'expert doit calculer la valeur de la concentration C_{ba} et l'introduire manuellement dans le logiciel dans « contact media ».</p>

Si $C_{pw,o} > S * 1000$, alors $J_{4o} = D_u * S * V_w / (D_{p,o} * P_w)$
 sinon $J_{4o} = D_u * C_{s,o} * Bulk / D_{p,o}$

Si $J_{3o} + J_{4o} < J_{2o}$, alors $J_{oa} = J_{3o} + J_{4o}$
 sinon $J_{oa} = J_{2o}$

Si la construction est munie d'un vide ventilé sur terre battue :

Si $D_{p,o} \leq H_e$, alors $J_{ba} = J_1$
 sinon ($D_{p,o} > H_e$)
 Si $J_{3b} + J_{4b} < J_{2b}$, alors $J_{ba} = J_{3b} + J_{4b}$
 sinon $J_{ba} = J_{2b}$

Si la construction est munie d'une cave bétonnée :

$J_{ba} = J_1$

Si le module VOLASOIL est utilisé

Si Cas E ou Cas F :

$L_s = D_{p,b}$

sinon $L_s = (d_g - z) - d_{c,volasoil}$

Si $L_s < 0,01$, alors $L_s = 0,01$

$K_s = \kappa / \eta$

$F_{sc} = K_s * (\Delta p_{cs} / L_s)$

$F_{ci} = (A_{of}^2 / (A_f * N * 8 * \eta)) * (\Delta p_{ic} / L_f)$

Si Cas A, Cas C, Cas E, Cas F ou Cas G :

$J_{ba,volasoil} = (-F_{sc} * C_{sa,b} * 1E6) / (\exp((-F_{sc} / D_{sa}) * L_s) - 1)$

Si Cas H :

$L_{gw} = d_{s,gw} + z$

$J_{ba,volasoil} = (-F_{sc} * K_{lw} * C_{gw,b} * 0,001) / (\exp(-F_{sc} * (L_s / D_{sa})) - 1 - (F_{sc} * K_{lw} * (L_{gw} / D_{sw})))$

Cas B, Cas D : sans objet

Métaux, métalloïdes et autres substances inorganiques :

$J_{oa} = 0$

$J_{ba} = 0$

J1	Flux dans la dalle de béton	$g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$
J2b	Flux vers la surface de la couche limite	$g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$
J2o	Flux dans la couche limite	$g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$
J3b	Flux d'évaporation d'eau vers le vide ventilé	$g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$
J3o	Flux d'évaporation d'eau vers la surface	$g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$
J4b ¹	Flux de diffusion eau-sol vers le vide ventilé ou la cave	$g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$
J4o	Flux de diffusion eau-sol vers la surface	$g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$
Joa	Flux total vers l'air extérieur	$g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$
Jba	Flux total vers le vide ventilé ou la cave	$g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$
Dsa	Coefficient de diffusion dans la phase gazeuse du sol	$m^2 \cdot h^{-1}$
Dsa,c	Coefficient de diffusion dans la phase gazeuse de la dalle de béton	$m^2 \cdot h^{-1}$

¹ Correspond à J5 dans la Figure 1 (VOLASOIL).

Csa,b	Concentration dans l'air du sol (surface bâtie)	$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
Dp,o	Profondeur moyenne de la pollution sous la surface du sol	m
dc	Epaisseur de la dalle de béton	m
Ev	Flux d'évaporation d'eau	$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{jr}^{-1}$
dg	Profondeur de l'eau souterraine (nappe)	m
z	Hauteur de la zone capillaire au-dessus du niveau de la nappe	m
dc,volasoil	Profondeur du vide ventilé sous la surface du sol	m
Du	Coefficient de diffusion dans le sol	$\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$
He	Hauteur du vide ventilé ou de la cave	m
Ls	Longueur de la colonne de sol	m
Dp,b	Profondeur de la pollution sous le vide ventilé	m
Ks	Conductivité à l'air du sol	$\text{m}^2\cdot\text{Pa}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$
kappa	Perméabilité à l'air du sol	m^2
eta	Viscosité dynamique de l'air	$\text{Pa}\cdot\text{h}$
Fsc	Flux d'air du sol vers le vide ventilé	$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$
deltapcs	Différence de pression entre le vide ventilé et l'air du sol	Pa
Fci	Flux d'air à travers le plancher du vide ventilé vers le rez-de-chaussée	$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$
Aof	Surface totale des fissures du plancher	m^2
Af	Surface totale du plancher	m^2
N	Nombre total de fissures dans le plancher	-
deltapic	Différence de pression entre le rez-de-chaussée et le vide ventilé	Pa
Lf	Epaisseur du plancher	m
Case H	Source de pollution sous le niveau de la nappe (milieu mal mélangé)	-
Jba,volasoil	Flux total de substance du sol vers le vide ventilé	$\text{g}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$
Lgw	Longueur de diffusion de la colonne d'eau souterraine	m
ds,gw	Profondeur de la source de pollution sous le niveau de la nappe	m
d	Epaisseur de la couche limite	m

B2-1.2.3 Dilution dans l'air extérieur

Après s'être évaporée à partir du sol, la substance chimique est diluée dans l'air extérieur. Le taux de dilution est déterminé par la vitesse moyenne du vent à la hauteur de respiration, le coefficient de dispersion verticale de Pasquill et le diamètre de la zone polluée. Lorsque la vitesse du vent et les coefficients de dispersion verticale de Pasquill sont des paramètres calculés, le taux de dilution est déterminé par la vitesse du vent à une hauteur h , la hauteur h , le diamètre de zone polluée, la rugosité du sol et la hauteur de respiration.

La stabilité de l'atmosphère est en outre un paramètre important. Dans une atmosphère stable, la différence entre la vitesse du vent à une certaine hauteur et à la hauteur de respiration est plus importante que dans une atmosphère instable ou une atmosphère neutre. Le modèle, développé aux Pays-Bas, fait l'hypothèse d'une atmosphère neutre, car cette situation est la plus courante aux Pays-Bas. La même hypothèse est retenue pour la Wallonie. La vitesse du vent et donc la dilution de la substance augmente avec la hauteur. Comme l'enfant est de plus petite taille que l'adulte, la concentration à la hauteur de respiration d'un enfant est plus élevée que la concentration à hauteur de respiration d'un adulte.

Toutes substances :

$$C_o = (10 * Z_o) ^ (0,53 * (L_p ^ -0,22))$$

$$S_z = C_o * 0,2 * (L_p ^ 0,76)$$

$$V_{\text{frict}} = (\text{karman} * V_h) / \ln(Z_h / Z_o)$$

Si $Z_o > Z_{aa}$, alors $V_{x,a} = 0$

$$\text{sinon } V_{x,a} = \ln(Z_{aa} / Z_o) * V_{\text{frict}} / \text{Karman}$$

$$V_{g,a} = (V_{x,a} + V_{\text{frict}}) / 2$$

$$V_{f,a} = V_{g,a} * S_z / L_p$$

$$\text{Si } Z_o > Z_c, \text{ alors } V_{x,c} = 0$$

$$\text{sinon } V_{x,c} = \ln(Z_c / Z_o) * V_{\text{frict}} / \text{Karman}$$

$$V_{g,c} = (V_{x,c} + V_{\text{frict}}) / 2$$

$$V_{f,c} = V_{g,c} * S_z / L_p$$

Co	Facteur de correction pour la longueur de rugosité	
Zo	Surface de rugosité	m
Lp	Diamètre de la zone polluée	m
Sz	Coefficient de dispersion vertical de Pasquill (stabilité de l'atmosphère de classe D)	m
Vfrict	Vitesse de friction	m.h ⁻¹
Karman	Constante de Karman	-
Vh	Vitesse du vent à la hauteur h (hauteur h = Zh)	m.h ⁻¹
Zh	Hauteur h	m
Zaa	Hauteur de respiration (adulte)	m
Vx,a	Vitesse du vent à la hauteur de respiration de l'adulte	m.h ⁻¹
Vg,a	Vitesse moyenne du vent à la hauteur de respiration de l'adulte	m.h ⁻¹
Vf,a	Vitesse de dilution (adulte)	m.h ⁻¹
Zc	Hauteur de respiration (enfant)	m
Vx,c	Vitesse du vent à la hauteur de respiration de l'enfant	v
Vg,c	Vitesse moyenne du vent à la hauteur de respiration de l'enfant	m.h ⁻¹
Vf,c	Vitesse de dilution (enfant)	m.h ⁻¹

B2-1.2.4 Concentration dans l'air extérieur

A partir de la vitesse de dilution et des flux calculés, on peut déduire les concentrations dans l'air extérieur comme indiqué ci-après :

Toutes substances :

Si Coa,a est connu, alors Coa,a est introduit
 sinon Coa,a = Joa * 1E+6 / Vf,a

Si Coa,c est connu, alors Coa,c est introduit
 sinon Coa,c = Joa * 1E+6 / Vf,c

Coa,a	Concentration dans l'air extérieur à hauteur de respiration de l'adulte	µg.m ⁻³
Coa,c	Concentration dans l'air extérieur à hauteur de respiration de l'enfant	µg.m ⁻³

B2-1.2.5 Concentration dans l'air intérieur

Après s'être évaporée à partir du sol, la substance chimique est diluée dans le vide ventilé ou la dalle de béton constituant l'interface entre le sol et la construction sus-jacente. L'intensité de la dilution dépend de la dimension du vide ventilé ou de la cave et du taux de renouvellement de l'air. Le taux

de renouvellement de l'air correspond au nombre de fois où le volume d'air contenu dans le vide ventilé ou la cave est renouvelé en une heure.

Le modèle suppose que la pollution prend sa source dans le vide ventilé ou la cave. La fraction de l'air intérieur en provenance du vide ventilé ou de la cave (fixée par défaut dans le modèle à 10%²) et la concentration dans le vide ventilé ou la cave déterminent la concentration dans l'air intérieur.

Toutes substances :

Concentration dans le vide ventilé ou la cave :

Si Cba est connu, alors Cba est introduit

Sinon :

Si CSOIL est utilisé

S'il s'agit d'une construction sur vide ventilé avec fond en terre battue

Si $He \geq D_{p,o}$

alors $C_{ba} = (J_{ba} * 1E+6 * 2 * He * (Le + Wi)) / (Le * Wi * He * Vr)$

sinon ($He < D_{p,o}$)

$C_{ba} = (J_{ba} * 1E+6 * Le * Wi) / (Le * Wi * He * Vr)$

S'il s'agit d'une construction sur cave bétonnée

Si $He \geq D_{p,o}$

alors $C_{ba} = (J_{ba} * 1E+6 * 2 * He * (Le + Wi)) / (Le * Wi * He * Vr)$

sinon ($He < D_{p,o}$)

alors $C_{ba} = J_{ba} * 1E+6 * ((Le * Wi + 2 * He * (Le + Wi)) / (Le * Wi * He * Vr))$

Si VOLASOIL est utilisé

Cas A, Cas C, Cas E, Cas F, Cas G ou Cas H

$vvc = (vrcb + (Fci * Af)) / Vc$

$C_{ba} = J_{ba_volasoil} * 1E+6 * (Af / (Vc * vvc))$

Cas B

$C_{ba} = Klw * C_{gw,b} * 1000$

Cas D

$C_{ba} = Vd$

Concentration dans l'air intérieur :

Si Cia est connu, alors Cia est introduit

sinon

Si CSOIL est utilisé

S'il s'agit d'une construction sur vide ventilé ou sur cave bétonnée

$Cia = \text{MAX}(fbi * C_{ba} ; Coa,a ; Coa,c)$

S'il s'agit d'une construction sur dalle en béton

$Cia = \text{MAX}((J1 * Wei * Lei) / (Wei * Lei * Hei * vvi) ; Coa,a ; Coa,c)$

² paramètre présenté dans le rapport INERIS (2005-a)

	<p>Erreur dans le logiciel RISC Human[®] v3.3 :</p> <p>Dans le logiciel RISC Human[®] v3.3, la concentration C_{ia} est exprimée en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et le flux dans la dalle de béton J1 en $[\text{g}/\text{m}^2.\text{h}]$. Il manque par conséquent un facteur 1.10^6.</p> <p>Afin de contourner cette erreur, l'expert doit calculer la valeur de la concentration C_{ia} et l'introduire manuellement dans le logiciel dans « <i>contact media</i> ».</p>
---	--

Si VOLASOIL est utilisé

$$v_{vi} = (v_{ri} + (F_{ci} * A_f)) / V_i$$

$$J_{cci} = F_{ci} * C_{ba} * 1E-6$$

$$C_{ia} = J_{cci} * 1E+6 * (A_f / V_i * v_{vi})$$

C_{ba}	Concentration dans le vide ventilé ou la cave	$\mu\text{g}.\text{m}^{-3}$
L_e	Longueur du vide ventilé ou de la cave	m
W_i	Largeur du vide ventilé ou de la cave	m
V_r	Taux de renouvellement de l'air	h^{-1}
v_{vc}	Taux de renouvellement de l'air dans le vide ventilé	h^{-1}
V_{rcb}	Taux de ventilation dans le vide ventilé	$\text{m}^3.\text{h}^{-1}$
V_c	Volume du vide ventilé	m^3
C_{ia}	Concentration dans l'air intérieur	$\mu\text{g}.\text{m}^{-3}$
f_{bi}	Fraction de l'air intérieur en provenance du vide ventilé ou de la cave	-
W_{ei}	Largeur du bâtiment	m
L_{ei}	Longueur du bâtiment	m
H_{ei}	Hauteur du bâtiment	m
v_{vi}	Taux de renouvellement de l'air dans le bâtiment	h^{-1}
v_{ri}	Taux de ventilation dans le bâtiment	$\text{m}^3.\text{h}^{-1}$
V_i	Volume du bâtiment	m^3
J_{cci}	Flux convectif de substance du vide ventilé vers l'intérieur du bâtiment	$\text{g}.\text{m}^{-2}.\text{h}^{-1}$

B2-1.3 Concentrations dans l'eau de boisson

B2-1.3.1 Perméation à travers les conduites de distribution

Les substances organiques contenues dans l'eau porale du sol peuvent polluer l'eau du robinet en transitant à travers les parois de certains types de conduites de distribution d'eau. Des informations relatives à la compatibilité des substances chimiques et des matériaux peuvent être obtenues auprès des fournisseurs de conduites et autres articles de plomberie. Généralement, les substances utilisées couramment comme solvants (benzène, trichloréthylène, etc.) et certains hydrocarbures aromatiques polycycliques sont capables de migrer par perméation à travers les matériaux plastiques courants de type polyéthylène et PVC.

Le phénomène de perméation des substances chimiques est décrit par la loi de Fick. Le flux de polluants à travers la paroi de la conduite résulte de la différence de concentration entre l'eau qui circule dans la conduite et l'eau porale contenue dans le sol qui entoure la conduite. Le phénomène de perméation se produit à travers toute l'épaisseur de la paroi de la conduite. Vonk (1985) a trouvé qu'un équilibre physico-chimique est atteint seulement après 60 à 400 jours, selon différents

paramètres tels que le type de substances chimiques ou le type de conduites. En conséquence, il est supposé que les forces induisant le phénomène de perméation sont constantes après 24 heures. La diffusion peut affecter la totalité de la surface de la conduite. La concentration totale de polluant diffusée au bout de 24 heures divisée par le volume d'eau de distribution utilisé quotidiennement par l'habitation est la concentration moyenne de l'eau de distribution.

Une concentration calculée dans l'eau de boisson via la perméation supérieure à la solubilité de la substance dans l'eau est corrigée de sorte qu'elle soit au maximum égale à la solubilité.

Substances organiques :

$$C_{wp} = (2 * D_{pe} * C_{pw} * 3 * (t_{dw} / 24) * \pi * L * (r_i / d_l)) / Q_{wd}$$

Contrôle sur la solubilité dans l'eau :

$$\text{Si } C_{wp} > S * 1000, \text{ alors } C_{wp} = S * 1000$$

Métaux, métalloïdes et autres substances inorganiques :

$$C_{wp} = 0$$

C _{wp}	Concentration dans l'eau de boisson due à la perméation	µg.l ⁻¹
D _{pe}	Coefficient de diffusion de la substance à travers le PEHD	m ² .jr ⁻¹
t _{dw}	Durée de stagnation de l'eau dans la conduite de distribution	h
L	Longueur de la conduite de distribution	m
r _i	Rayon interne de la conduite de distribution	m
d _l	Epaisseur de la paroi de la conduite de distribution	m
Q _{wd}	Quantité d'eau utilisée quotidiennement dans la maison ou le bâtiment	m ³ .jr ⁻¹

B2-1.3.2 Concentration dans l'eau de boisson

La concentration dans l'eau de boisson dépend de la nature de cette eau. S'il s'agit d'eau souterraine, alors la concentration dans l'eau de boisson est égale à la concentration dans l'eau souterraine. S'il s'agit d'eau en provenance du réseau de distribution, alors la concentration de l'eau de boisson est égale à la concentration calculée après perméation.

Toutes substances :

Si C_{dw} est connu, alors C_{dw} est introduit

sinon

si l'eau souterraine est utilisée comme eau de boisson (sans traitement préalable)

$$C_{dw} = C_{gw}$$

sinon

Substances organiques :

$$C_{dw} = C_{wp}$$

Métaux, métalloïdes et substances inorganiques :

$$C_{dw} = 0$$

C _{dw}	Concentration dans l'eau de boisson	µg.l ⁻¹
-----------------	-------------------------------------	--------------------

B2-1.3.3 Concentration dans l'air de la salle de bains

Un certain nombre de paramètres et de variables résultantes sont importants dans la détermination de l'intensité de l'évaporation des substances chimiques : le coefficient de transport massique dans la phase aqueuse et dans la phase gazeuse, la constante de Henry donnée pour des températures proches de celle de l'eau de douche, la constante des gaz parfaits, la température de l'eau de la douche ainsi que le diamètre et le temps de chute d'une goutte d'eau. Les équations utilisées dans le calcul sont basées sur la théorie de Mackay *et al.* (1985). L'intensité de l'évaporation dépend de la substance chimique. En effet, le coefficient de transport massique dépend lui-même de la masse moléculaire de la substance.

La concentration dans l'air de la salle de bains dépend de l'intensité de l'évaporation de la substance, du volume d'eau utilisé pendant la douche et du volume de la salle de bains. La concentration de l'eau de distribution multipliée par le volume d'eau utilisé pendant la douche donne la quantité totale de la substance mise en jeu pendant la prise de douche. La quantité de substance vaporisée est calculée à partir de cette quantité totale et de l'intensité de l'évaporation. Le volume de la salle de bains intervient ensuite pour déterminer la concentration dans l'air dans la salle de bains. Il s'agit d'une concentration valable juste après la prise de douche. La concentration avant la douche est considérée comme nulle. La concentration moyenne dans l'air de la salle de bains est la moyenne de ces deux concentrations.

Substances organiques :

Si $K_{lw} = 0$, alors $H_{sh} = 0$

sinon $H_{sh} = e^{(\ln K_{lw} / (R_{gas} * T_{soil}) + 0,024 * (T_{sh} - T_{soil}))}$

$$k_{Gcal} = (K_{gc} * (18 / M)^{1/2}) / 3600$$

$$k_{Lcal} = (K_{lc} * (44 / M)^{1/2}) / 3600$$

$$k_{wa} = \{(H_{sh} / (R_{gas} * T_{sh})) * k_{Lcal} * k_{Gcal}\} / \{(H_{sh} / (R_{gas} * T_{sh}) * k_{Gcal}) + k_{Lcal}\} * (t_f * 3 / r_d)$$

$$C_{br} = k_{wa} * V_{ws} * C_{dw} * 1000 / (2 * V_{br})$$

Métaux, métalloïdes et autres substances inorganiques :

$C_{br} = 0$

Hsh	Constante de Henry à la température de l'eau de la douche	$\text{Pa.m}^3.\text{mol}^{-1}$
Tsh	Température de l'eau de la douche	K
kGcal	Coefficient de transfert massique gazeux	m.h^{-1}
kLcal	Coefficient de transfert massique liquide	m.h^{-1}
Kgc	Coefficient de transport de masse pour la phase gazeuse	m.h^{-1}
Klc	Coefficient de transport de masse pour la phase liquide	m.h^{-1}
kwa	Quantité d'évaporation	-
tf	Temps de chute d'une goutte d'eau	sec
rd	Rayon d'un goutte d'eau	m
Cbr	Concentration dans l'air de la salle de bains	$\mu\text{g.m}^{-3}$
Vws	Volume d'eau utilisé pendant la douche	m^3
Vbr	Volume de la salle de bains	m^3

B2-1.4 Concentrations dans les plantes potagères

B2-1.4.1 Facteurs de bioconcentration

Le facteur de bioconcentration (BCF) est défini comme le quotient de la concentration de la substance dans une plante sur la concentration de la substance dans le sol.

Dans le modèle de RISC Human[®] v. 3.3, deux catégories de plantes potagères sont considérées :

- les « racines » (exclusivement pommes de terre) ;
- les « légumes » (reprenant les légumes-racines autres que les pommes de terre, les légumes-feuilles et les légumes-fruits).

Le calcul de la concentration dans les plantes requiert donc deux BCF, exprimés en poids frais. Leurs unités dépendent des substances considérées.

Substances organiques

Les BCF utilisés pour le calcul des concentrations en substances organiques dans les plantes sont :

- le $BCF_{s, fw}$ en $\frac{(mg / kg_{lég-fw})}{(mg / dm^3_{solution})}$ pour les « légumes »
- le $BCF_{r, fw}$ en $\frac{(mg / kg_{rac-fw})}{(mg / dm^3_{solution})}$ pour les « racines »

Les BCF exprimés en poids frais peuvent être obtenus :

- soit à partir des BCF exprimés en poids sec et de la teneur en eau des plantes considérées (« racines » ou « légumes »), repris dans la fiche du polluant (.SUB) ;
- soit, dans la mesure où aucun BCF n'est spécifié dans la fiche du polluant, selon les régressions adaptées de Briggs et al. (1982,1983) ; ils sont alors directement calculés par RISC Human[®] v. 3.3 selon les équations suivantes :

$$BCF_{r, fw} \left[\frac{mg / kg_{fw}}{mg / dm^3_{solution}} \right] = 10^{(nd \times 0.77 \times \log K_{ow} - 1.52)} + 0.82$$

$$BCF_{s, fw} \left[\frac{mg / kg_{fw}}{mg / dm^3_{solution}} \right] = \left[10^{(nd \times 0.95 \times \log K_{ow} - 2.05)} + 0.82 \right] \times 0.784 \times \left[10^{\left(\frac{-0.434 \times nd \times \log K_{ow} - 1.78^2}{2.44} \right)} \right]$$

Ces relations ont été obtenues pour des composés organiques ayant des log Kow compris entre -0.57 et 3.7. McKone & Maddalena (2007) étendent la validité de la régression jusqu'à un log Kow de 6 ; au-delà de cette valeur, il est recommandé de limiter le log Kow à 6.

RISC Human[®] v.3.3 ne tenant pas compte de ce domaine de validité, les BCFs calculés à partir des régressions bornées ont été introduits dans le fichier .SUB pour les polluants concernés à condition d'être inférieurs à valeur maximale autorisée par RISC Human[®] v.3.3. (soit la valeur de $100 (mg_{polluant}/kg_{dw}) / (mg_{polluant}/dm^3)$).

	<p>Unités pour les BCFs dans RISC Human[®] v3.3.</p> <p>Contrairement à ce qui est noté dans le « Help » du logiciel RISC Human[®] v3.3., les valeurs de BCF introduites dans le fichier .SUB doivent être exprimées en poids sec, soit en $(mg_{polluant}/kg_{dw}) / (mg_{polluant}/dm^3)$.</p> <p>Lorsque ces valeurs de BCFs dépassent la valeur maximale autorisée par RISC Human[®] v.3.3. (soit la valeur de $100 (mg_{polluant}/kg_{dw}) / (mg_{polluant}/dm^3)$), il n'est pas possible de renseigner les BCF dans le fichier .SUB. Il convient dès lors :</p> <ul style="list-style-type: none"> - pour les substances organiques listées au Tableau 1 - de calculer
---	---

	<p>séparément les BCF_r, puis les concentrations dans les « racines » à l'aide des équations³ présentées ci-dessous, et de les introduire ensuite manuellement dans le logiciel RISC Human[®] v. 3.3, via l'onget « Edit Measurements/Contact media > concentrations in tuberous plants » ;</p> <p>– pour le dibenzo(a,h)anthracène exclusivement de calculer séparément le BCF_s pour les « légumes » puis la concentration dans ceux-ci à l'aide des équations⁴ présentées ci-dessous, et de l'introduire ensuite manuellement dans le logiciel RISC Human[®] v. 3.3, via l'onget « Edit Measurements/Contact media > concentrations in leafy plants ».</p>
--	--

Tableau 1 – Polluants organiques ayant un log Kow supérieur à 6 et pour lesquelles les concentrations dans les « racines » et les « légumes » doivent être calculées séparément puis introduites manuellement dans RISC Human[®] v. 3.3.

Substance	log Kow	Calcul manuel		Valeurs à retenir	
		Cro	Cst	BCF _{r,fw} (mg/kg _{fw})/(mg/dm ³)	BCF _{s,fw} (mg/kg _{fw})/(mg/dm ³)
Benzo(a)pyrène	6,13	x		102 ⁽¹⁾	2,38 ⁽⁵⁾
Dibenzo(a,h)anthracène	7,11	x	x	105 ⁽²⁾	74,7 ⁽³⁾
Benzo(k)fluoranthène	6.11	x		1259,75 ⁽⁴⁾	2,38 ⁽⁵⁾
Benzo(g,h,i)pérylène	6.22	x			
Indéno(1,2,3-c,d)pyrène	6.87	x			
Ali EC>10-12	6.78	x			
Ali EC>12-16	7.39	x			
Ali EC>16-21	10	x			
Ali EC>21-35	12.4	x			
Arom EC>21-35	6.022	x			

- (1) La valeur de BCF_r pour le benzo(a)pyrène n'a pas été calculé par les relations de Briggs mais a été fixé à la moyenne géométrique des BCF de la gamme mentionnée par Edwards (1983) relatifs à la pomme de terre (gamme 0,01 - 1 exprimés en poids sec) (cf. Annexe B4 pour les références); la valeur de 0,1 (mg/kg_{dw})/(mg/kg_{sol}) est équivalente à 102 (mg/kg_{fw})/(mg/dm³) en considérant les propriétés du sol standard et un fdwr de 0,167.
- (2) La valeur de BCF_r pour le dibenzo(a,h)anthracène n'a pas été calculée par les relations de Briggs mais a été fixée à 0,0492 (mg/kg_{dw})/(mg/kg_{sol}) d'après les données disponibles dans la base de données SACARTOM (2003) (Terre témoin) (cf. Annexe B4 pour les références) ; la valeur de 0,0492 (mg/kg_{dw})/(mg/kg_{sol}) est équivalente à 105 (mg/kg_{fw})/(mg/dm³) en considérant les propriétés du sol standard et un fdwr de 0,167.
- (3) La valeur de BCFs pour le dibenzo(a,h)anthracène n'a pas été calculée par les relations de Briggs mais a été fixée à 0,072 (mg/kg_{dw})/(mg/kg_{sol}) d'après les données disponibles dans la base de données SACARTOM (2003) (Terre témoin) (cf. Annexe B4 pour les références) ; la valeur de 0,072 (mg/kg_{dw})/(mg/kg_{sol}) est équivalente à 74,7 (mg/kg_{fw})/(mg/dm³) en considérant les propriétés du sol standard et un fdwr de 0,081. Ce BCFs ne peut être introduit dans le fichier .SUB car la valeur dépasse le maximum autorisé par le logiciel (922 (mg/kg_{dw})/(mg/dm³) = 74,7 (mg/kg_{fw})/(mg/dm³) / 0,081).
- (4) Correspond au BCF_r calculé selon les relations adaptées de Briggs et al. (1982,1983), avec un log Kow borné à 6 (McKone & Maddalena, 2007).
- (5) Cette valeur correspond au BCFs calculé selon les relations adaptées de Briggs et al. (1982,1983), avec un log Kow borné à 6 (McKone & Maddalena, 2007). Pour les polluants organiques ayant un log Kow > 6, les BCFs pour les légumes ont déjà été introduits dans le fichier .SUB (à l'exception du BCF du dibenzo(ah)anthracène). La valeur correspondante en poids sec est de 29,38 (mg/kg_{dw})/(mg/dm³).

³ reprises de RISC Human[®] v. 3.3

⁴ reprises de RISC Human[®] v. 3.3

Métaux et métalloïdes

Les BCF utilisés pour le calcul des concentrations dans les plantes sont :

- le $BCF_{s, fw}$ en $\frac{(mg / kg_{lég-fw})}{(mg / kg_{sol})}$ pour les « légumes »
- le $BCF_{r, fw}$ en $\frac{(mg / kg_{rac-fw})}{(mg / kg_{sol})}$ pour les « racines »

Les BCF exprimés en poids frais peuvent être obtenus :

- soit à partir des BCF exprimés en poids sec et de la teneur en eau des plantes considérées (« racines » ou « légumes »), repris dans la fiche du polluant (.SUB) ;
- soit, dans la mesure où aucun BCF n'est spécifié dans la fiche du polluant, selon la régression de Baes et al. (1984) ; ils sont alors directement calculés par RISC Human[®] v. 3.3.

Autres substances inorganiques

Il n'est pas nécessaire de disposer d'un BCF pour les substances inorganiques non métalliques.

Pour le scénario agricole, le $BCF_{herbe/bétail}$ permettant de calculer la concentration présente dans l'herbe assimilée par le bétail est fixé au BCFs (assimilation par l'homme de la concentration présente dans les plantes de la catégorie « légumes »).

B2-1.4.2 Concentration dans les plantes

La concentration dans le sol multipliée par le BCF (exprimé en poids frais) donne la concentration assimilée dans la plante.

Dans RISC Human[®] v. 3.3, il est admis que, d'une part, la concentration en substances inorganiques dans l'eau de la plante est la même que la concentration dans l'eau du sol, et d'autre part, que toute la pollution est dissoute dans l'eau de la plante.

Substances organiques :

$$Cst = BCF_{s, fw} * C_{pw, g} * 0.001$$

$$Cro = BCF_{r, fw} * C_{pw, g} * 0.001$$

Métaux et métalloïdes :

$$Cst = BCF_{s, fw} * C_{s, g}$$

$$Cro = BCF_{r, fw} * C_{s, g}$$

Autres substances inorganiques :

$$Cst = (1-fdws) * C_{pw, g} * 0.001$$

$$Cro = (1-fdwr) * C_{pw, g} * 0.001$$

Cst	Concentration moyenne dans les plantes appartenant à la catégorie « légumes »	mg.kg ⁻¹ poids frais
Cro	Concentration moyenne dans les plantes appartenant à la catégorie « racines » (exclusivement les pommes de terre)	mg.kg ⁻¹ poids frais

Pour le scénario agricole, l'exposition du bétail à l'ingestion d'herbe requiert une concentration dans l'herbe. Dans le modèle RISC Human[®] v. 3.3, cette concentration dans l'herbe est assimilée à la concentration dans les plantes de la catégorie « légumes ».

Par l'intermédiaire du dépôt de particules en suspension dans l'air extérieur, des particules de sol pollué se déposent sur les parties aériennes des plantes (principalement les feuilles). Une partie de cette pollution est adsorbée par la plante. Le phénomène de dépôt n'est pas pris en compte pour les « racines », car les parties consommables de ces plantes poussent sous la surface du sol.

Toutes substances :

$$C_{dep,a} = (f_{in} / (Y_v * f_{Ei})) * \{ 1 - ((1 - e^{-f_{Ei} * t_e}) / (f_{Ei} * t_e)) \} * TSPo * 1E-6 * DRo * frso * C_{s,g} * fdws$$

$$C_{dep,cat} = (f_{in} / (Y_v * f_{Ei})) * \{ 1 - ((1 - e^{-f_{Ei} * t_g}) / (f_{Ei} * t_g)) \} * TSPo * 1E-6 * DRo * frso * C_{s,g} * fdws$$

Cdep,a	Concentration moyenne dans les "légumes" liée au dépôt particulaire (adulte)	mg.kg ⁻¹ poids frais
Cdep,cat	Concentration moyenne dans l'herbe liée au dépôt particulaire (bétail)	mg.kg ⁻¹ poids frais
f _{in}	Fraction interceptée	-
Y _v	Rendement de la récolte	mg poids sec.m ⁻²
f _{Ei}	Constante climatique (décroissance par dégradation)	jr ⁻¹
t _e	Période de croissance de la culture	jr
t _g	Période de croissance de l'herbe	jr
TSPo	Quantité de particules en suspension dans l'air	mg sol.m ³ air
DRo	Vitesse de déposition en extérieur	mg.m ⁻² .jr ⁻¹
frso	Fraction de poussières constituées de particules de sol (extérieur)	

La concentration totale dans la plante est donc définie par :

- pour la catégorie « racines » par la concentration par assimilation ;
- pour la catégorie « légumes » par la concentration par assimilation et par dépôt.

B2-1.5 Concentrations dans la viande et le lait

Pour l'estimation des concentrations dans la viande et le lait, il y a lieu de tenir compte de l'exposition de l'animal par inhalation d'air (cas des polluants organiques volatils ou semi-volatils exclusivement) et de poussières, ainsi que par les apports liés à l'alimentation (herbe), à l'eau et au sol ingéré. Il est à noter que l'exposition des animaux par inhalation est faible et généralement négligeable par rapport à l'exposition par ingestion.

Les concentrations dans le tissu de l'animal (C_{me}) et dans le lait (C_{mi}) sont données par les relations du type :

$$\begin{cases} C_{me} = Tlcat \times K_{me} \\ C_{mi} = Tlcat \times K_{mi} \end{cases}$$

où

Tlcat est la dose d'exposition de l'animal (en mg_{polluant}/jour), calculée dans par RISC Human[®] v. 3.3 selon un scénario d'exposition du bétail (cf. 0) ;

K_{me} est le coefficient de partition viande/diète ; ce paramètre correspond au rapport de la concentration en polluants dans la viande sur la dose d'exposition journalière [(mg_{polluant}/kg_{viande f.w})/(mg_{polluant}/jr)] et s'apparente au coefficient de biotransfert pour la viande (parfois noté BTF) ;

K_{mi} est le coefficient de partition lait/diète ; ce paramètre correspond au rapport de la concentration en polluants dans le lait sur la dose d'exposition journalière $[(mg_{polluant}/kg_{lait})/(mg_{polluant}/jr)]$ et s'apparente au coefficient de biotransfert pour le lait (parfois noté BTF).

Les coefficients de partition K_{me} et K_{mi} peuvent (entre autres) être obtenus à l'aide des régressions établies par Travis & Arms (1998) à partir du coefficient de partition octanol/eau K_{ow} . Or ces régressions ne sont valables que pour un intervalle donné de valeurs de $(\log) K_{ow}$, dont il n'est pas tenu compte dans RISC Human[®] v. 3.3. **Il convient dès lors, pour les substances organiques listées au Tableau 2, de calculer séparément les concentrations dans la viande et dans le lait à l'aide des équations⁵ présentées ci-dessous, et de les introduire ensuite manuellement dans le logiciel RISC Human[®] v. 3.3.**

Tableau 2 – Substances organiques pour lesquelles les concentrations dans la viande (C_{me}) et/ou dans le lait (C_{mi}) doivent être calculées manuellement puis introduites dans RISC Human[®] v. 3.3

Substance	log K _{ow}	Calcul manuel	
		C _{mi}	C _{me}
Benzène	2.13	x	
Toluène	2.73	x	
Phénol	1.47	x	
MTBE	0.94	x	x
Arom EC>6-7	2.13	x	
Arom EC>7-8	2.73	x	
Chloroéthène	1.52	x	
Dichloroéthane (1,2-)	1.47	x	
Dichlorométhane	1.25	x	x
Dichloroéthène (cis-1,2-)	1.86	x	
Dichloroéthène (trans-1,2-)	1.93	x	
1,1,1-trichloroéthane	2.49	x	
1,1,2-trichloroéthane	2.38	x	
Trichloroéthène	2.61	x	
Trichlorométhane	1.97	x	
Dibenzo(ah)anthracène	7.11	x	x
Ali EC>12-16	7.39	x	x
Ali EC>16-21	10	x	x
Ali EC>21-35	12.4	x	x

Pour les substances organiques, les concentrations estimées en polluant dans la viande (C_{me}) ou le lait (C_{mi}) sont obtenues selon trois approches différentes, la valeur finale étant fixée à la valeur [minimum(maximum (C_{m1} ; C_{m2}) ; C_{m3})].

Dans *la première approche*, liée au paramètre « C_{m1} », les concentrations dans les tissus animaux (C_{me}, C_{mi}) sont estimées à partir de la dose d'exposition de l'animal (TI_{cat}) (via l'ingestion de sol,

⁵ reprises de RISC Human[®] v. 3.3

d'herbe, d'eau et inhalation) et des coefficients de partition pour la viande (K_{me}) et le lait (K_{mi}) obtenus à l'aide des régressions établies par Travis & Arms, à savoir :

- le K_{me} est calculé via la régression de Travis & Arms (1988) établie pour 36 composés organiques. soit :

$$\log K_{me} = -7.735 + 1.033 \times \log K_{ow}$$

La régression est valable pour des $\log K_{ow}$ compris entre 1,3 et 6,9. Pour des valeurs inférieures à 1,3 ou supérieures à 6,9, il est recommandé de retenir comme $\log K_{ow}$, la valeur de 1,3 ou 6,9 ;

- le K_{mi} est calculé sur base de la régression de Travis & Arms (1988) établie pour 28 composés organiques, soit :

$$\log K_{mi} = -8.056 + 0.992 \times \log K_{ow}$$

La régression est valable pour des $\log K_{ow}$ compris entre 2,8 et 6,9. Pour des valeurs inférieures à 2,8 ou supérieures à 6,9, il est recommandé de retenir comme $\log K_{ow}$ la valeur de 2,8 ou 6,9.

Les concentrations estimées en polluant dans la viande (C_{me}) ou le lait (C_{mi}) sont alors obtenues selon les relations suivantes :

$$\begin{cases} C_{me} = Tl_{cat} \times K_{me} \\ C_{mi} = Tl_{cat} \times K_{mi} \end{cases}$$

La deuxième approche, liée au paramètre « C_{m2} », permet l'estimation de la concentration en polluant dans un tissu animal (C_{me} , C_{mi}) à partir du facteur de bioconcentration $BCF_{di\grave{e}te/viande}$, de la dose d'exposition journalière de l'animal et des quantités ingérées quotidiennement.

Sachant que

$$\begin{cases} C_{me} = BCF_{di\grave{e}te/viande} \times \frac{Tl_{cat}}{\sum Q_{t\acute{e}s \text{ ing\acute{e}r\acute{e}es \text{ par \text{ jour } } } \text{ exprim\acute{e}es en mati\grave{e}re s\grave{e}che}} \\ C_{mi} = BCF_{di\grave{e}te/lait} \times \frac{Tl_{cat}}{\sum Q_{t\acute{e}s \text{ ing\acute{e}r\acute{e}es \text{ par \text{ jour } } } \text{ exprim\acute{e}es en mati\grave{e}re s\grave{e}che}} \end{cases}$$

et

$$\begin{cases} C_{me} = Tl_{cat} \times K_{me} \\ C_{mi} = Tl_{cat} \times K_{mi} \end{cases}$$

les coefficients de partition K_{me} et K_{mi} sont donnés par les relations suivantes :

$$\begin{cases} K_{me} = \frac{BCF_{di\grave{e}te/viande}}{\sum Q_{t\acute{e}s \text{ ing\acute{e}r\acute{e}es \text{ par \text{ jour } } } \text{ en m.s.}} \\ K_{mi} = \frac{BCF_{di\grave{e}te/lait}}{\sum Q_{t\acute{e}s \text{ ing\acute{e}r\acute{e}es \text{ par \text{ jour } } } \text{ en m.s.}} \end{cases}$$

avec $BCF_{di\grave{e}te/viande}$ ou $BCF_{di\grave{e}te/lait}$ estimés à partir du coefficient de partition graisse/diète Kfa $[(mg_{polluant}/kg_{graisse})/(mg_{polluant}/kg_{di\grave{e}te\ m.s})]$, obtenu à l'aide de la régression déduite de Travis & Arms (1988), et des fractions de graisse dans la viande ($ffme$) ou le lait ($ffmi$) :

$$\begin{cases} BCF_{di\grave{e}te/viande} = Kfa \times ffme \\ BCF_{di\grave{e}te/lait} = Kfa \times ffmi \end{cases} \quad \text{et } \log Kfa = -3.457 + 0.500 \times \log Kow$$

	<p>Erreur dans le logiciel RISC Human[®] v3.3 :</p> <p>Dans le logiciel RISC Human[®] v3.3, les quantités ingérées par le bétail sont exprimées en matière fraîche alors qu'elles doivent s'exprimer en matière sèche.</p> <p>L'expert doit préciser des quantités ingérées par le bétail exprimées en matière sèche.</p>
---	---

La troisième approche, liée au paramètre « Cm3 », estime les concentrations dans la viande (Cme) et le lait (Cmi) à partir d'un bilan massique, comme suit :

$$\begin{cases} Cme = Tcat \times Kme = \frac{Tcat \times Tcat \times ffme}{Wcat \times ffme + Qmi \times SDmi \times Tcat \times ffmi} \\ Cmi = Tcat \times Kmi = \frac{Tcat \times Tcat \times ffmi}{Wcat \times ffme + Qmi \times SDmi \times Tcat \times ffmi} \end{cases}$$

où

$Tcat$ est le temps d'exposition de l'animal sur le site pollué [j] ;

$Wcat$ est le poids de l'animal [kg] ;

Qmi est la production journalière de lait [L/j] ;

$SDmi$ est la masse volumique du lait [kg/L].

Les coefficients de partition (Kme , Kmi) sont donnés par les relations suivantes :

$$\begin{cases} Kme = \frac{Tcat \times ffme}{Wcat \times ffme + Qmi \times SDmi \times Tcat \times ffmi} \\ Kmi = \frac{Tcat \times ffmi}{Wcat \times ffme + Qmi \times SDmi \times Tcat \times ffmi} \end{cases}$$

Pour les métaux lourds et les composés inorganiques, les coefficients de partition dans la viande (Kme) et dans le lait (Kmi) sont calculés respectivement selon les relations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{me} = \frac{T_{cat} \times (1 - ff_{me})}{W_{cat} + QW_{cat} \times T_{cat} \times f_{excr}} \\ K_{mi} = \frac{T_{cat} \times (1 - ff_{mi}) \times f_{excr}}{W_{cat} + QW_{cat} \times T_{cat} \times f_{excr}} \end{array} \right.$$

où

QW_{cat} est la consommation quotidienne d'eau de l'animal [L/j] ;

f_{excr} est la fraction excrétée par l'animal de la dose de polluant absorbée [-].

Il est à noter que les fractions excrétées par le bétail sont spécifiques aux polluants. Actuellement, la valeur attribuée dans le fichier .SUB pour l'ensemble des métaux lourds normés est égale à un ⁶.

B2-1.6 Autres voies d'exposition

Les voies d'exposition citées dans les rubriques sus-jacentes sont typiques des scénarios d'exposition les plus couramment rencontrés mais ne sont pas exhaustives. Par exemple, le scénario d'exposition pourrait faire apparaître les voies d'exposition par ingestion de poisson, d'œufs ou de gibier qui nécessitent un travail de recherche spécifique, en particulier si les substances en présence sont connues pour leur propriété de bioaccumulation dans ces milieux. Etant donné le peu de données expérimentales parfois disponibles, les mesures directes dans le milieu pourront s'avérer être un outil précieux.

B2-1.7 Calcul des doses individuelles (par voie d'exposition)

La dose correspond à la concentration (dans le sol, l'eau, l'air, les légumes, etc.) multipliée par une quantité (par exemple, quantité d'eau ingérée) et le temps d'exposition (par exemple, durée de l'inhalation d'air intérieur). Les calculs des concentrations ont été détaillés dans les sections précédentes. L'estimation des quantités et durées et le calcul des doses réalisé avec le logiciel RISC Human[®] v. 3.3 sont présentés ci-dessous.

Le calcul des doses d'exposition par ingestion de viande et de lait intervenant dans le scénario agricole (usage résidentiel en zone rurale) seront développées pour la version de fin septembre.

B2-1.7.1 Répartition du temps ou durée d'exposition

La répartition du temps décrit le temps qu'un adulte ou un enfant passe sur le site pollué. Le modèle suppose que le temps d'exposition pour le contact dermique à l'intérieur est égal au temps de séjour à l'intérieur des bâtiments moins le temps de sommeil⁷. Le contact dermique à l'extérieur des bâtiments est inférieur ou égal au temps d'exposition défini pour l'inhalation d'air extérieur.

⁶ Les valeurs attribuées à ce paramètre pourront éventuellement être revues ultérieurement.

⁷ L'équation permettant d'obtenir la moyenne annuelle du temps passé quotidiennement à l'intérieur pour l'exposition par inhalation (t_{ia}/t_{ic}) est obtenue en sommant la moyenne annuelle du temps passé quotidiennement à l'intérieur pour l'exposition par contact dermique (t_{dai}/t_{dci}) et la moyenne annuelle du temps de sommeil quotidien.

Le modèle suppose qu'une année possède 50 semaines (l'adulte ou l'enfant ne fréquente pas le site pendant deux semaines par an, par exemple il part en vacances, et le lieu de villégiature pendant cette période est supposé exempt de pollution). Cela signifie que le temps d'exposition quotidien est une moyenne sur ces 50 semaines. Ces moyennes quotidiennes sont calculées comme indiqué ci-après.

Toutes substances :

Adultes (a)

$$tiai = \{(dd,a,i,w,w * wd,a,i,w,w * jd,a,i,w,w) + (dd,a,i,w,f * wd,a,i,w,f * jd,a,i,w,f) + (dd,a,i,s,w * wd,a,i,s,w * jd,a,i,s,w) + (dd,a,i,s,f * wd,a,i,s,f * jd,a,i,s,f) + (d,a,s * w,a,s * j,a,s)\} / dy$$

$$tiao = \{(di,a,o,w,w * wi,a,o,w,w * ji,a,o,w,w) + (di,a,o,w,f * wi,a,o,w,f * ji,a,o,w,f) + (di,a,o,s,w * wi,a,o,s,w * ji,a,o,s,w) + (di,a,o,s,f * wi,a,o,s,f * ji,a,o,s,f)\} / dy$$

$$tdai = \{(dd,a,i,w,w * wd,a,i,w,w * jd,a,i,w,w) + (dd,a,i,w,f * wd,a,i,w,f * jd,a,i,w,f) + (dd,a,i,s,w * wd,a,i,s,w * jd,a,i,s,w) + (dd,a,i,s,f * wd,a,i,s,f * jd,a,i,s,f)\} / dy$$

$$tdao = \{(dd,a,o,w,w * wd,a,o,w,w * jd,a,o,w,w) + (dd,a,o,w,f * wd,a,o,w,f * jd,a,o,w,f) + (dd,a,o,s,w * wd,a,o,s,w * jd,a,o,s,w) + (dd,a,o,s,f * wd,a,o,s,f * jd,a,o,s,f)\} / dy$$

Enfants (c)

$$tici = \{(dd,c,i,w,w * wd,c,i,w,w * jd,c,i,w,w) + (dd,c,i,w,f * wd,c,i,w,f * jd,c,i,w,f) + (dd,c,i,s,w * wd,c,i,s,w * jd,c,i,s,w) + (dd,c,i,s,f * wd,c,i,s,f * jd,c,i,s,f) + (d,c,s * w,c,s * j,c,s)\} / dy$$

$$tico = \{(di,c,o,w,w * wi,c,o,w,w * ji,c,o,w,w) + (di,c,o,w,f * wi,c,o,w,f * ji,c,o,w,f) + (di,c,o,s,w * wi,c,o,s,w * ji,c,o,s,w) + (di,c,o,s,f * wi,c,o,s,f * ji,c,o,s,f)\} / dy$$

$$tdci = \{(dd,c,i,w,w * wd,c,i,w,w * jd,c,i,w,w) + (dd,c,i,w,f * wd,c,i,w,f * jd,c,i,w,f) + (dd,c,i,s,w * wd,c,i,s,w * jd,c,i,s,w) + (dd,c,i,s,f * wd,c,i,s,f * jd,c,i,s,f)\} / dy$$

$$tdco = \{(dd,c,o,w,w * wd,c,o,w,w * jd,c,o,w,w) + (dd,c,o,w,f * wd,c,o,w,f * jd,c,o,w,f) + (dd,c,o,s,w * wd,c,o,s,w * jd,c,o,s,w) + (dd,c,o,s,f * wd,c,o,s,f * jd,c,o,s,f)\} / dy$$

tiai	Moyenne annuelle du temps passé quotidiennement à l'intérieur pour l'exposition par inhalation (adulte)	h.jr ⁻¹
tiao	Moyenne annuelle du temps passé quotidiennement à l'extérieur pour l'exposition par inhalation (adulte)	h.jr ⁻¹
tdai	Moyenne annuelle du temps passé quotidiennement à l'intérieur pour l'exposition par contact dermique (adulte)	h.jr ⁻¹
tdao	Moyenne annuelle du temps passé quotidiennement à l'extérieur pour l'exposition par contact dermique (adulte)	h.jr ⁻¹
tici	Moyenne annuelle du temps passé quotidiennement à l'intérieur pour l'exposition par inhalation (enfant)	h.jr ⁻¹
tico	Moyenne annuelle du temps passé quotidiennement à l'extérieur pour l'exposition par inhalation (enfant)	h.jr ⁻¹
tdci	Moyenne annuelle du temps passé quotidiennement à l'intérieur pour l'exposition par contact dermique (enfant)	h.jr ⁻¹
tdco	Moyenne annuelle du temps passé quotidiennement à l'extérieur pour l'exposition par contact dermique (enfant)	h.jr ⁻¹
dd,a,i,w,w	Nombre d'heures par jour pour l'exposition par contact dermique (adulte, intérieur, hiver, jour de travail)	h.jr ⁻¹
wd,a,i,w,w	Nombre de jours par semaine pour l'exposition par contact dermique (adulte, intérieur, hiver, jour de travail)	jr.sem ⁻¹
jd,a,i,w,w	Nombre de semaines par an pour l'exposition par contact dermique (adulte, intérieur, hiver, jour de travail)	sem.an ⁻¹
dd,a,i,w,f	Nombre d'heures par jour pour l'exposition par contact dermique (adulte, intérieur, hiver, jour de congé)	h.jr ⁻¹
wd,a,i,w,f	Nombre de jours par semaine pour l'exposition par contact dermique (adulte, intérieur, hiver, jour de congé)	jr.sem ⁻¹
jd,a,i,w,f	Nombre de semaines par an pour l'exposition par contact dermique (adulte, intérieur, hiver, jour de congé)	sem.an ⁻¹
dd,a,i,s,w	Nombre d'heures par jour pour l'exposition par contact dermique (adulte, intérieur, été, jour de travail)	h.jr ⁻¹
wd,a,i,s,w	Nombre de jours par semaine pour l'exposition par contact dermique (adulte, intérieur, été, jour de travail)	jr.sem ⁻¹
jd,a,i,s,w	Nombre de semaines par an pour l'exposition par contact dermique (adulte, intérieur, été, jour de travail)	sem.an ⁻¹
dd,a,i,s,f	Nombre d'heures par jour pour l'exposition par contact dermique (adulte, intérieur, été, jour de congé)	h.jr ⁻¹
wd,a,i,s,f	Nombre de jours par semaine pour l'exposition par contact dermique (adulte, intérieur, été, jour de congé)	jr.sem ⁻¹
jd,a,i,s,f	Nombre de semaines par an pour l'exposition par contact dermique (adulte, intérieur, été, jour de congé)	sem.an ⁻¹
d,a,s	Nombre d'heures par jour de sommeil sur le site (adulte)	h.jr ⁻¹
w,a,s	Nombre de jours par semaine de sommeil sur le site (adulte)	jr.sem ⁻¹
j,a,s	Nombre de semaines par an de sommeil sur le site (adulte)	sem.an ⁻¹
dy	Nombre de jours par an	jr.an ⁻¹
di,a,o,w,w	Nombre d'heures par jour pour l'exposition par inhalation (adulte, extérieur, hiver, jour de travail)	h.jr ⁻¹
wi,a,o,w,w	Nombre de jours par semaine pour l'exposition par inhalation (adulte, extérieur, hiver, jour de travail)	jr.sem ⁻¹

ji,a,o,w,w	Nombre de semaines par an pour l'exposition par inhalation (adulte, extérieur, hiver, jour de travail)	sem.an ⁻¹
di,a,o,w,f	Nombre d'heures par jour pour l'exposition par inhalation (adulte, extérieur, hiver, jour de congé)	h.jr ⁻¹
wi,a,o,w,f	Nombre de jours par semaine pour l'exposition par inhalation (adulte, extérieur, hiver, jour de congé)	jr.sem ⁻¹
ji,a,o,w,f	Nombre de semaines par an pour l'exposition par inhalation (adulte, extérieur, hiver, jour de congé)	sem.an ⁻¹
di,a,o,s,w	Nombre d'heures par jour pour l'exposition par inhalation (adulte, extérieur, été, jour de travail)	h.jr ⁻¹
wi,a,o,s,w	Nombre de jours par semaine pour l'exposition par inhalation (adulte, extérieur, été, jour de travail)	jr.sem ⁻¹
ji,a,o,s,w	Nombre de semaines par an pour l'exposition par inhalation (adulte, extérieur, été, jour de travail)	sem.an ⁻¹
di,a,o,s,f	Nombre d'heures par jour pour l'exposition par inhalation (adulte, extérieur, été, jour de congé)	h.jr ⁻¹
wi,a,o,s,f	Nombre de jours par semaine pour l'exposition par inhalation (adulte, extérieur, été, jour de congé)	jr.sem ⁻¹
ji,a,o,s,f	Nombre de semaines par an pour l'exposition par inhalation (adulte, extérieur, été, jour de congé)	sem.an ⁻¹
dd,a,o,w,w	Nombre d'heures par jour pour l'exposition par contact dermique (adulte, extérieur, hiver, jour de travail)	h.jr ⁻¹
wd,a,o,w,w	Nombre de jours par semaine pour l'exposition par contact dermique (adulte, extérieur, hiver, jour de travail)	jr.sem ⁻¹
jd,a,o,w,w	Nombre de semaines par an pour l'exposition par contact dermique (adulte, extérieur, hiver, jour de travail)	sem.an ⁻¹
dd,a,o,w,f	Nombre d'heures par jour pour l'exposition par contact dermique (adulte, extérieur, hiver, jour de congé)	h.jr ⁻¹
wd,a,o,w,f	Nombre de jours par semaine pour l'exposition par contact dermique (adulte, extérieur, hiver, jour de congé)	jr.sem ⁻¹
jd,a,o,w,f	Nombre de semaines par an pour l'exposition par contact dermique (adulte, extérieur, hiver, jour de congé)	sem.an ⁻¹
dd,a,o,s,w	Nombre d'heures par jour pour l'exposition par contact dermique (adulte, extérieur, été, jour de travail)	h.jr ⁻¹
wd,a,o,s,w	Nombre de jours par semaine pour l'exposition par contact dermique (adulte, extérieur, été, jour de travail)	jr.sem ⁻¹
jd,a,o,s,w	Nombre de semaines par an pour l'exposition par contact dermique (adulte, extérieur, été, jour de travail)	sem.an ⁻¹
dd,a,o,s,f	Nombre d'heures par jour pour l'exposition par contact dermique (adulte, extérieur, été, jour de congé)	h.jr ⁻¹
wd,a,o,s,f	Nombre de jours par semaine pour l'exposition par contact dermique (adulte, extérieur, été, jour de congé)	jr.sem ⁻¹
jd,a,o,s,f	Nombre de semaines par an pour l'exposition par contact dermique (adulte, extérieur, été, jour de congé)	sem.an ⁻¹
dd,c,i,w,w	Nombre d'heures par jour pour l'exposition par contact dermique (enfant, intérieur, hiver, jour d'école)	h.jr ⁻¹
wd,c,i,w,w	Nombre de jours par semaine pour l'exposition par contact dermique (enfant, intérieur, hiver, jour d'école)	jr.sem ⁻¹

jd,c,i,w,w	Nombre de semaines par an pour l'exposition par contact dermique (enfant, intérieur, hiver, jour d'école)	sem.an ⁻¹
dd,c,i,w,f	Nombre d'heures par jour pour l'exposition par contact dermique (enfant, intérieur, hiver, jour de congé)	h.jr ⁻¹
wd,c,i,w,f	Nombre de jours par semaine pour l'exposition par contact dermique (enfant, intérieur, hiver, jour de congé)	jr.sem ⁻¹
jd,c,i,w,f	Nombre de semaines par an pour l'exposition par contact dermique (enfant, intérieur, hiver, jour de congé)	sem.an ⁻¹
dd,c,i,s,w	Nombre d'heures par jour pour l'exposition par contact dermique (enfant, intérieur, été, jour d'école)	h.jr ⁻¹
wd,c,i,s,w	Nombre de jours par semaine pour l'exposition par contact dermique (enfant, intérieur, été, jour d'école)	jr.sem ⁻¹
jd,c,i,s,w	Nombre de semaines par an pour l'exposition par contact dermique (enfant, intérieur, été, jour d'école)	sem.an ⁻¹
dd,c,i,s,f	Nombre d'heures par jour pour l'exposition par contact dermique (enfant, intérieur, été, jour de congé)	h.jr ⁻¹
wd,c,i,s,f	Nombre de jours par semaine pour l'exposition par contact dermique (enfant, intérieur, été, jour de congé)	jr.sem ⁻¹
jd,c,i,s,f	Nombre de semaines par an pour l'exposition par contact dermique (enfant, intérieur, été, jour de congé)	sem.an ⁻¹
d,c,s	Nombre d'heures de sommeil par jour sur le site (enfant)	h.jr ⁻¹
w,c,s	Nombre de jours par semaine de sommeil sur le site (enfant)	jr.sem ⁻¹
j,c,s	Nombre de semaines de sommeil par an sur le site (enfant)	sem.an ⁻¹
di,c,o,w,w	Nombre d'heures par jour pour l'exposition par inhalation (enfant, extérieur, hiver, jour d'école)	h.jr ⁻¹
wi,c,o,w,w	Nombre de jours par semaine pour l'exposition par inhalation (enfant, extérieur, hiver, jour d'école)	jr.sem ⁻¹
ji,c,o,w,w	Nombre de semaines par an pour l'exposition par inhalation (enfant, extérieur, hiver, jour d'école)	sem.an ⁻¹
di,c,o,w,f	Nombre d'heures par jour pour l'exposition par inhalation (enfant, extérieur, hiver, jour de congé)	h.jr ⁻¹
wi,c,o,w,f	Nombre de jours par semaine pour l'exposition par inhalation (enfant, extérieur, hiver, jour de congé)	jr.sem ⁻¹
ji,c,o,w,f	Nombre de semaines par an pour l'exposition par inhalation (enfant, extérieur, hiver, jour de congé)	sem.an ⁻¹
di,c,o,s,w	Nombre d'heures par jour pour l'exposition par inhalation (enfant, extérieur, été, jour d'école)	h.jr ⁻¹
wi,c,o,s,w	Nombre de jours par semaine pour l'exposition par inhalation (enfant, extérieur, été, jour d'école)	jr.sem ⁻¹
ji,c,o,s,w	Nombre de semaines par an pour l'exposition par inhalation (enfant, extérieur, été, jour d'école)	sem.an ⁻¹
di,c,o,s,f	Nombre d'heures par jour pour l'exposition par inhalation (enfant, extérieur, été, jour de congé)	h.jr ⁻¹
wi,c,o,s,f	Nombre de jours par semaine pour l'exposition par inhalation (enfant, extérieur, été, jour de congé)	jr.sem ⁻¹
ji,c,o,s,f	Nombre de semaines par an pour l'exposition par inhalation (enfant, extérieur, été, jour de congé)	sem.an ⁻¹
dd,c,o,w,w	Nombre d'heures par jour pour l'exposition par contact dermique (enfant, extérieur, hiver, jour d'école)	h.jr ⁻¹
wd,c,o,w,w	Nombre de jours par semaine pour l'exposition par contact dermique (enfant, extérieur, hiver, jour d'école)	jr.sem ⁻¹
jd,c,o,w,w	Nombre de semaines par an pour l'exposition par contact dermique (enfant, extérieur, hiver, jour d'école)	sem.an ⁻¹
dd,c,o,w,f	Nombre d'heures par jour pour l'exposition par contact dermique (enfant, extérieur, hiver, jour de congé)	h.jr ⁻¹
wd,c,o,w,f	Nombre de jours par semaine pour l'exposition par contact dermique (enfant, extérieur, hiver, jour de congé)	jr.sem ⁻¹

	extérieur, hiver, jour de congé)	
jd,c,o,w,f	Nombre de semaines par an pour l'exposition par contact dermique (enfant, extérieur, hiver, jour de congé)	sem.an ⁻¹
dd,c,o,s,w	Nombre d'heures par jour pour l'exposition par contact dermique (enfant, extérieur, été, jour d'école)	h.jr ⁻¹
wd,c,o,s,w	Nombre de jours par semaine pour l'exposition par contact dermique (enfant, extérieur, été, jour d'école)	jr.sem ⁻¹
jd,c,o,s,w	Nombre de semaines par an pour l'exposition par contact dermique (enfant, extérieur, été, jour d'école)	sem.an ⁻¹
dd,c,o,s,f	Nombre d'heures par jour pour l'exposition par contact dermique (enfant, extérieur, été, jour de congé)	h.jr ⁻¹
wd,c,o,s,f	Nombre de jours par semaine pour l'exposition par contact dermique (enfant, extérieur, été, jour de congé)	jr.sem ⁻¹
jd,c,o,s,f	Nombre de semaines par an pour l'exposition par contact dermique (enfant, extérieur, été, jour de congé)	sem.an ⁻¹

Pour le scénario agricole, il est également nécessaire de définir le temps d'exposition du bétail au site pollué. Par défaut, le modèle suppose que le bétail passe l'été à l'extérieur et l'hiver à l'intérieur.

Toutes substances :

$$N_{so,cat} = (t_{so,cat} * d_{so,cat} * w_{s,cat}) / 8400$$

$$N_{wo,cat} = (t_{wo,cat} * d_{wo,cat} * w_{w,cat}) / 8400$$

$$N_{si,cat} = \{(24 - t_{so,cat}) * (7 - d_{so,cat}) * w_{s,cat}\} / 8400$$

$$N_{wi,cat} = \{(24 - t_{wo,cat}) * (7 - d_{wo,cat}) * w_{w,cat}\} / 8400$$

Nso,cat	Fraction du temps que le bétail passe à l'extérieur en été	-
t,so,cat	Nombre d'heures par jour que le bétail passe à l'extérieur en été	h.jr ⁻¹
d,so,cat	Nombre de jours par semaine que le bétail passe à l'extérieur en été	jr.sem ⁻¹
w,s,cat	Nombre de semaines par an que compte l'été du bétail	sem.an ⁻¹
Nwo,cat	Fraction du temps que le bétail passe à l'extérieur en hiver	-
t,wo,cat	Nombre d'heures par jour que le bétail passe à l'extérieur en hiver	h.jr ⁻¹
d,wo,cat	Nombre de jours par semaine que le bétail passe à l'extérieur en hiver	jr.sem ⁻¹
w,w,cat	Nombre de semaines par an que compte l'hiver du bétail	sem.an ⁻¹
Nsi,cat	Fraction du temps que le bétail passe à l'intérieur en été	-
t,si,cat	Nombre d'heures par jour que le bétail passe à l'intérieur en été	h.jr ⁻¹
d,si,cat	Nombre de jours par semaine que le bétail passe à l'intérieur en été	jr.sem ⁻¹
Nwi,cat	Fraction du temps que le bétail passe à l'intérieur en hiver	-
t,wi,cat	Nombre d'heures par jour que le bétail passe à l'intérieur en hiver	h.jr ⁻¹
d,wi,cat	Nombre de jours par semaine que le bétail passe à l'intérieur en hiver	jr.sem ⁻¹

B2-1.7.2 Ingestion de sol

Le calcul de dose se base sur la quantité de sol ingérée quotidiennement moyennée sur une année. La moyenne quotidienne sur l'année est calculée comme suit : la quantité moyenne de sol ingérée quotidiennement (ID) – les jours où l'ingestion est comptabilisée – est multipliée par la fréquence d'ingestion (Tdo) et divisée par le nombre de jours dans l'année (dy = 350, supposant qu'une année possède 50 semaines et qu'il y a 7 jours par semaine).

Toutes substances :*Adultes (a)*

$$AIDa = Tdoa * IDa / dy$$

Enfants (c)

$$AIDc = Tdoc * IDc / dy$$

AIDa	Quantité moyenne de sol ingérée quotidiennement (adulte)	mg.jr ⁻¹
AIDc	Quantité moyenne de sol ingérée quotidiennement (enfant)	mg.jr ⁻¹
Tdoa	Fréquence d'exposition pour l'ingestion de sol (adulte)	jr.an ⁻¹
Tdoc	Fréquence d'exposition pour l'ingestion de sol (enfant)	jr.an ⁻¹
IDa	Quantité de sol ingérée quotidiennement les jours où l'ingestion de sol est considérée (adulte)	mg.jr ⁻¹
IDc	Quantité de sol ingérée quotidiennement les jours où l'ingestion de sol est considérée (enfant)	mg.jr ⁻¹

Pour obtenir la dose, la quantité de sol ingérée est multipliée par la concentration du sol et le facteur d'absorption et divisée par le poids corporel. L'application du facteur 1E-6 est nécessaire pour obtenir le résultat en mg/kg.j.

Toutes substances :*Adultes (a)*

$$Dla = AIDa * Cs,o * 1E-6 * fa / Wa$$

Enfants (c)

$$Dlc = AIDc * Cs,o * 1E-6 * fa / Wc$$

Dla	Exposition par ingestion de sol et de poussières de sol (adulte)	mg.kg ⁻¹ _{p.c.} .jr ⁻¹
Dlc	Exposition par ingestion de sol et de poussières de sol (enfant)	mg.kg ⁻¹ _{p.c.} .jr ⁻¹
fa	Fraction absorbée	-
Wa	Poids corporel (adulte)	kg
Wc	Poids corporel (enfant)	kg

Pour le scénario agricole, la dose correspondant à l'ingestion de sol par le bétail (avec l'herbe) se calcule à partir de la concentration dans le sol, de la quantité moyenne de sol ingérée quotidiennement (AIDcat), de la fraction absorbée par le bétail ainsi que des paramètres relatifs aux temps d'exposition.

Toutes substances

$$Dlcat = Cs,g * AIDcat * fa,cat * (Nso,cat + Nwo,cat)$$

Dlcat	Exposition par ingestion de sol et de poussières de sol (bétail)	mg.jr ⁻¹
AIDcat	quantité moyenne de sol ingérée quotidiennement (bétail)	kg.jr ⁻¹
fa,cat	Fraction absorbée par le bétail	-

B2-1.7.3 Ingestion de végétaux

Les facteurs suivants interviennent dans le calcul de l'exposition (ou dose) via ingestion des végétaux : la concentration dans les végétaux appartenant aux catégories « légumes » et « racines » (pommes de terre uniquement), le taux d'autoconsommation (pourcentage de légumes consommés qui provient de la culture sur le site pollué), la consommation totale de légumes et le poids corporel.

Toutes substances :

Adultes (a)

$$V_{Ia} = \{(C_{pr} * f_{ta} * Q_{vra} * f_a) + (C_{ps} * f_{la} * Q_{vla} * f_a)\} / W_a$$

Enfants (c)

$$V_{Ic} = \{(C_{pr} * f_{tc} * Q_{vrc} * f_a) + (C_{ps} * f_{lc} * Q_{vlc} * f_a)\} / W_c$$

V _{Ia}	Exposition par ingestion de légumes (adulte)	mg.kg ⁻¹ _{p.c.} .jr ⁻¹
V _{Ic}	Exposition par ingestion de légumes (enfant)	mg.kg ⁻¹ _{p.c.} .jr ⁻¹
f _{ta}	Taux d'autoconsommation des légumes-racines (adulte)	-
f _{tc}	Taux d'autoconsommation des légumes- racines (enfant)	-
Q _{vra}	Consommation quotidienne de légumes-racines (adulte)	kg _{fw} .jr ⁻¹
Q _{vrc}	Consommation quotidienne de légumes-racines (enfant)	kg _{fw} .jr ⁻¹
f _{la}	Taux d'autoconsommation des légumes-feuilles (adulte)	-
f _{lc}	Taux d'autoconsommation des légumes-feuilles (enfant)	-
Q _{vla}	Consommation quotidienne de légumes-feuilles (adulte)	kg _{fw} .jr ⁻¹
Q _{vlc}	Consommation quotidienne de légumes-feuilles (enfant)	kg _{fw} .jr ⁻¹

Les taux d'autoconsommation doivent faire l'objet d'une recherche la plus spécifique possible (pour les quantités de légumes : questionnaire riverains, statistiques régionales ou nationales, par défaut, données de pays voisins (par exemple, base de données CIBLEX pour les régions françaises Picardie et Nord-Pas-de-Calais - régions aux habitudes alimentaires proches de la Région wallonne).

Pour le scénario agricole, la dose correspondant à l'exposition du bétail par ingestion d'herbe est calculée sur base de la concentration dans l'herbe, de la consommation moyenne quotidienne d'herbe par le bétail et de la quantité absorbée par le bétail.

Toutes substances

$$V_{Icat} = (C_{st} + C_{dep,cat}) * Q_{g,cat} * f_{a,cat}$$

V _{Icat}	Exposition par ingestion d'herbe (bétail)	mg.jr ⁻¹
Q _{g,cat}	Consommation quotidienne d'herbe (bétail)	kg.jr ⁻¹

B2-1.7.4 Ingestion d'eau de boisson

La concentration de l'eau de boisson, la consommation journalière d'eau de boisson, le facteur d'absorption et le poids corporel sont utilisés pour calculer l'exposition par ingestion d'eau de boisson. L'application du facteur de 0,001 est nécessaire afin d'obtenir un résultat en mg/kg.j.

Toutes substances :*Adultes (a)*

$$DIw,a = (Cdw * 0,001 * Qdwa * fa) / Wa$$

Enfants (c)

$$DIw,c = (Cdw * 0,001 * Qdwc * fa) / Wc$$

DIw,a	Exposition par ingestion d'eau de boisson (adulte)	mg.kg ⁻¹ _{p.c.} .jr ⁻¹
DIw,c	Exposition par ingestion d'eau de boisson (enfant)	mg.kg ⁻¹ _{p.c.} .jr ⁻¹
Cdw	Concentration dans l'eau de boisson	µg.l ⁻¹
Qdwa	Consommation quotidienne d'eau de boisson (adulte)	dm ³ .jr ⁻¹
Qdwc	Consommation quotidienne d'eau de boisson (enfant)	dm ³ .jr ⁻¹

Pour le scénario agricole, l'exposition du bétail à l'ingestion d'eau (de boisson) dépend de la provenance de l'eau (eau de surface, eau souterraine, eau de distribution), de la quantité consommée quotidiennement et de la fraction absorbée. Le facteur de 0.001 permet d'obtenir un résultat en mg/jr.

Toutes substances

$$DIw,cat = (Cdw * 0,001 * (1 - fg,cat - fs,cat) + Cgw,g * 0,001 * fg,cat + Csw * 0,001 * fs,cat) * fa,cat * Qw,cat$$

DIw,cat	Exposition par ingestion d'eau [de boisson] (bétail)	mg.jr ⁻¹
Cdw	Concentration dans l'eau de distribution	µg.l ⁻¹
fg,cat	Fraction d'eau souterraine dans l'eau [de boisson] du bétail	-
fs,cat	Fraction d'eau de surface dans l'eau [de boisson] du bétail	-
Cgw,g	Concentration dans l'eau souterraine	µg.l ⁻¹
Csw	Concentration dans l'eau de surface	µg.l ⁻¹
Qwcat	Consommation quotidienne d'eau (bétail)	dm ³ .jr ⁻¹

B2-1.7.5 Contact dermique avec le sol et les poussières de sol

Le modèle suppose que l'absorption dermique n'est pas pertinente pour les métaux, métalloïdes et autres substances inorganiques. En ce qui concerne les substances organiques, l'exposition par contact dermique avec le sol et les poussières de sol tient compte des paramètres suivants : la concentration et la quantité de sol et de poussières de sol sur la peau, la surface de peau exposée, le facteur d'effet matrice, le taux d'absorption, le temps d'exposition et le poids corporel.

Il est à noter que d'autres approches sont disponibles dans la littérature spécialisée. Pour information, l'expert peut se référer au guide RAGS développé par l'EPA (2004).

Substances organiques :*Adultes (a)*

$$DAa = \{(DAEa,o * DARa * fm * Aexp,a,o * tdao * Cs,o) + (DAEa,i * DARa * fm * frs,i * Aexp,a,i * tdai * Cs,o)\} / Wa$$

Enfants (c)

$$DAC = \{(DAEc,o * DARc * fm * Aexp,c,o * tdco * Cs,o) + (DAEc,i * DARc * fm * frs,i * Aexp,c,i * tdci * Cs,o)\} / Wc$$

Métaux, metalloïdes et autres substances inorganiques :*Adultes (a)*

DAa = 0

Enfants (c)

DAc = 0

DAa	Exposition par contact dermique avec le sol et les particules de sol (adulte)	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}_{\text{p.c.}} \cdot \text{jr}^{-1}$
DAEa,o	Quantité de sol sur la peau (adulte, extérieur)	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$
DARa	Taux d'absorption cutanée (adulte)	h^{-1}
fm	Facteur d'effet matrice	-
Aexp,a,o	Surface de peau exposée (adulte, extérieur)	m^2
tdao	Moyenne annuelle de temps passé à l'extérieur soumis au contact dermique avec le sol et les poussières de sol (adulte)	$\text{h} \cdot \text{jr}^{-1}$
DAEa,i	Quantité de sol sur la peau (adulte, intérieur)	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$
frs,i	Fraction de poussières constituées de particules de sol (intérieur)	
Aexp,a,i	Surface de peau exposée (adulte, intérieur)	m^2
tdai	Moyenne annuelle de temps passé à l'intérieur soumis au contact dermique avec le sol et les poussières de sol (adulte)	$\text{h} \cdot \text{jr}^{-1}$
DAc	Exposition par contact dermique avec le sol et les particules de sol (enfant)	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}_{\text{p.c.}} \cdot \text{jr}^{-1}$
DAEc,o	Quantité de sol sur la peau (enfant, extérieur)	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$
DARc	Taux d'absorption cutanée (enfant)	h^{-1}
Aexp,c,o	Surface de peau exposée (enfant, extérieur)	m^2
tdco	Moyenne annuelle de temps passé à l'extérieur soumis au contact dermique avec le sol et les poussières de sol (enfant)	$\text{h} \cdot \text{jr}^{-1}$
DAEc,i	Quantité de sol sur la peau (enfant, intérieur)	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$
Aexp,c,i	Surface de peau exposée (enfant, intérieur)	m^2
tdci	Moyenne annuelle de temps passé à l'intérieur soumis au contact dermique avec le sol et les poussières de sol (enfant)	$\text{h} \cdot \text{jr}^{-1}$

B2-1.7.6 Contact dermique avec l'eau durant la douche

L'équation permettant de calculer l'absorption dermique des substances contenues dans l'eau (DARw) est décrite par Fiserova-Bergerova and Pierce, 1990.

Le calcul se base sur la concentration dans l'eau de distribution après évaporation, la surface totale de la peau, la fraction de la peau exposée durant la douche, le taux d'absorption dermique, le temps d'exposition et le poids corporel. L'application du facteur de 0,001 est nécessaire afin d'obtenir un résultat en mg/kg.j.

Il est à noter que d'autres approches sont disponibles dans la littérature spécialisée. Pour information, l'expert peut se référer au guide RAGS développé par l'EPA (2004)⁵⁷.

Substances organiques :

$$\text{DARw} = ((5000 * \text{Perm}) / (5000 + \text{Perm})) * (e^{-0,016 * M}) / 1,5$$

$$\text{Perm} = 0,038 + 0,153 * 10^{\log \text{Kow}}$$

Adultes (a)

$$\text{DAwa} = (\text{Atot,a} * \text{fexp} * \text{DARw} * \text{tdsh} * (1 - \text{kwa}) * \text{Cdw} * 0,001) / \text{Wa}$$

Enfants (c)

$$DA_{wc} = (Atot,c * f_{exp} * DARw * tdsh * (1 - kwa) * Cdw * 0,001) / Wc$$

Métaux, métalloïdes et autres substances inorganiques :*Adultes (a)*

$$DA_{wa} = 0$$

Enfants (c)

$$DA_{wc} = 0$$

DARw	Taux d'absorption cutanée pour l'exposition aux substances contenues dans l'eau	$[(\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}) / (\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}) \text{h}^{-1}]$
Perm	Paramètre permettant le calcul de DARw	-
DA _{wa}	Exposition par contact cutané avec l'eau de la douche (adulte)	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{p.c.} \cdot \text{j} \cdot \text{r}^{-1}$
Atot,a	Surface de peau exposée durant la douche (adulte)	m^2
f _{exp}	Fraction de peau exposée durant la douche	-
tdsh	Temps passé sous la douche	h
kwa	Intensité de l'évaporation	-
Cdw	Concentration dans l'eau de distribution	$\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$
DA _{wc}	Exposition par contact cutané avec l'eau de la douche (enfant)	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{p.c.} \cdot \text{j} \cdot \text{r}^{-1}$
Atot,c	Surface de peau exposée durant la douche (enfant)	m^2

B2-1.7.7 Inhalation de sol et de poussières de sol

La quantité de sol et de poussières de sol en suspension dans l'air, le pourcentage de particules polluées (pourcentage de particules provenant du sol pollué), le temps d'exposition, le taux de respiration, la concentration dans le sol et les poussières, le facteur d'absorption et le poids corporel sont utilisés pour calculer l'exposition par inhalation de sol et de poussières de sol. L'application du facteur de 1E-6 est nécessaire afin d'obtenir un résultat en mg/kg.j.

Substances organiques :*Adultes (a)*

$$IPa = ((TSPo * frs,o * tia) + (TSPi * frs,i * tia)) * AVa * Cs,o * fr * fa * / (Wa * 1E-6)$$

Enfants (c)

$$IPc = ((TSPo * frs,o * tico) + (TSPi * frs,i * tici)) * AVc * Cs,o * fr * fa * / (Wc * 1E-6)$$

IPa	Exposition par inhalation de sol et de poussières de sol (adulte)	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{p.c.} \cdot \text{j} \cdot \text{r}^{-1}$
IPc	Exposition par inhalation de sol et de poussières de sol (enfant)	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{p.c.} \cdot \text{j} \cdot \text{r}^{-1}$
TSPo	Quantité de particules en suspension dans l'air à l'extérieur	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
frs,o	Fraction de particules provenant du sol pollué à l'extérieur	-
TSPi	Quantité de particules en suspension dans l'air à l'intérieur	$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
frs,i	Fraction de particules provenant du sol pollué à l'intérieur	-
fr	Taux de rétention pulmonaire	-
AVa	Taux de respiration (adulte)	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
AVc	Taux de respiration (enfant)	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Pour le scénario agricole, l'exposition du bétail par inhalation de sol et de poussières de sol se calcule de manière similaire à celle des hommes.

Toutes substances

$$IP_{cat} = C_{s,g} * AV_{cat} * fr_{,cat} * fa_{,cat} * \{TSP_o * fr_{s,o} * (N_{so,cat} + N_{wo,cat}) + TSP_i * fr_{s,i} * (N_{si,cat} + N_{wi,cat})\}$$

IP _{cat}	Exposition par inhalation de sol et de poussières de sol (bétail)	mg.jr ⁻¹
C _{s,g}	Concentration dans le sol	mg.kg ⁻¹ _{ms}
AV _{cat}	Taux de respiration (bétail)	m ³ .h ⁻¹
TSP _o	Quantité de particules en suspension dans l'air à l'extérieur	mg.m ⁻³
fr _{s,o}	Fraction de particules provenant du sol pollué à l'extérieur	-
TSP _i	Quantité de particules en suspension dans l'air à l'intérieur	mg.m ⁻³
fr _{s,i}	Fraction de particules provenant du sol pollué à l'intérieur	-
Fr _{,cat}	Taux de rétention pulmonaire (bétail)	-

B2-1.7.8 Inhalation d'air intérieur

Le calcul de l'exposition par inhalation d'air intérieur se base sur le taux de respiration, la concentration dans l'air ambiant, le facteur d'absorption, le temps d'exposition à l'inhalation à l'intérieur et le poids corporel. L'application du facteur de 0.001 est nécessaire afin d'obtenir un résultat en mg/kg.j.

Toutes substances :*Adultes (a)*

$$IV_{i,a} = (AV_a * 0.001 * C_{ia} * fa * t_{ia}) / W_a$$

Enfants (c)

$$IV_{i,c} = (AV_c * 0.001 * C_{ic} * fa * t_{ic}) / W_c$$

IV _{i,a}	Exposition par inhalation d'air intérieur (adulte)	mg.kg ⁻¹ _{p.c.jr}
IV _{i,c}	Exposition par inhalation d'air intérieur (enfant)	mg.kg ⁻¹ _{p.c.jr}

Pour le scénario agricole, l'exposition du bétail à l'inhalation d'air intérieur est regroupée avec l'exposition par l'inhalation d'air extérieur.

B2-1.7.9 Inhalation d'air extérieur

Le taux de respiration, la concentration dans l'air extérieur, le facteur d'absorption, le temps d'exposition et le poids corporel sont utilisés pour calculer l'exposition par inhalation d'air extérieur. L'application du facteur de 0.001 est nécessaire afin d'obtenir un résultat en mg/(kg.jr).

Toutes substances :*Adultes (a)*

$$IV_{o,a} = (AV_a * 0.001 * C_{oa} * fa * t_{oa}) / W_a$$

Enfants (c)

$$IV_{o,c} = (AV_c * 0.001 * C_{oc} * fa * t_{oc}) / W_c$$

IV _{o,a}	Exposition par inhalation d'air extérieur (adulte)	mg.kg ⁻¹ _{p.c.jr}
IV _{o,c}	Exposition par inhalation d'air extérieur (enfant)	mg.kg ⁻¹ _{p.c.jr}

Pour le scénario agricole, l'exposition du bétail à l'inhalation d'air (intérieur et extérieur) se calcule comme suit. Le facteur 0.001 permet d'obtenir des résultats en mg/(kg.jr).

Toutes substances

$$IV_{cat} = AV_{cat} * fa_{cat} * \{Coa_{cat} * 0.001 * (Nso_{cat} + Nwo_{cat}) + Cia_{cat} * 0.001 * (Nsi_{cat} + Nwi_{cat})\}$$

IV _{cat}	Exposition par inhalation d'air [intérieur et extérieur] (bétail)	mg.jr ⁻¹
Coa _{cat}	Concentration dans l'air extérieur (bétail)	µg.m ⁻³
Cia _{cat}	Concentration dans l'air intérieur (bétail)	µg.m ⁻³

B2-1.7.10 Inhalation de vapeurs durant la douche

La concentration dans l'air de la salle de bains, le taux de respiration, le temps d'exposition, le facteur d'absorption et le poids corporel sont utilisés pour calculer l'exposition par inhalation de vapeurs durant la douche. L'application du facteur de 0.001 est nécessaire afin d'obtenir un résultat en mg/(kg.jr).

Toutes substances :

Adultes (a)

$$IV_{w,a} = \{Cbr * 0.001 * AV_a * (tdrd + tdsh) * fa\} / W_a$$

Enfants (c)

$$IV_{w,c} = \{Cbr * 0.001 * AV_c * (tdrd + tdsh) * fa\} / W_c$$

IV _{w,a}	Exposition par inhalation de vapeurs durant la douche (adulte)	mg.kg ⁻¹ _{p.c.} .jr ⁻¹
IV _{w,c}	Exposition par inhalation de vapeurs durant la douche (enfant)	mg.kg ⁻¹ _{p.c.} .jr ⁻¹
tdrd	Durée du séchage et de l'habillage	h/jr
tdsh	Durée de la douche	h/jr

B2-2 Calcul des doses d'exposition par inhalation de produits volatils via RISC Human[®] v. 3.3 (VOLASOIL)

Après une présentation des différents flux que considère VOLASOIL, cette section décrit brièvement les 8 cas spécifiques⁸ gérés par le modèle pour lesquels les risques associés à une volatilisation doivent être quantifiés :

- Cas A : Pollution de l'eau souterraine (système parfaitement mélangé) ;
- Cas B : Eau souterraine polluée dans le vide ventilé ;
- Cas C : Présence d'une phase liquide non aqueuse flottante (LNAPL) ;
- Cas D : Eau souterraine polluée dans le vide ventilé et présence d'une couche surnageante (flottante) ;
- Cas E : Présence de produit pur dans la zone vadose ;
- Cas F : Pollution d'une nappe profonde ;
- Cas G : Présence d'une phase liquide non aqueuse plongeante (DNAPL – système parfaitement mélangé) ;
- Cas H : Source de pollution située en dessous du niveau piézométrique (système non parfaitement mélangé).

Toutes les figures sont reprises de Waitz *et al.* (1996)⁹, ouvrage auquel il est recommandé de se référer pour plus d'informations concernant le fonctionnement de VOLASOIL.

B2-2.1 Hypothèses et flux considérés dans VOLASOIL

Le modèle VOLASOIL est basé sur le transport stationnaire et admet en outre les hypothèses suivantes :

- absence de dégradation biologique ;
- source inépuisable de polluant à une profondeur donnée sous le niveau du sol ;
- sol homogène ;
- sorption (hors-équilibre) de composés volatils dans la zone vadose ;
- absence de transport latéral ou de lessivage.

La Figure 2 présente les différents compartiments du sol et de l'air ambiant ainsi que les flux associés à chacun d'eux. Selon les cas considérés, les flux résultants dans l'air ambiant sont calculés au départ du compartiment le plus pertinent (Figure 3). Les équations permettant de calculer ces flux et les concentrations correspondantes sont reprises dans la section précédente (cf. § B2-1). Seules sont présentées ici les configurations correspondant aux différents cas ainsi que les éventuelles équations spécifiques.

⁸ Ces 8 cas décrivent des situations indépendantes ; il convient dès lors de retenir celui qui correspond le mieux au site étudié. L'addition des résultats obtenus dans l'air ambiant pour différents cas n'est donc pas pertinente.

⁹ Rapport no. 715810014 du RIVM

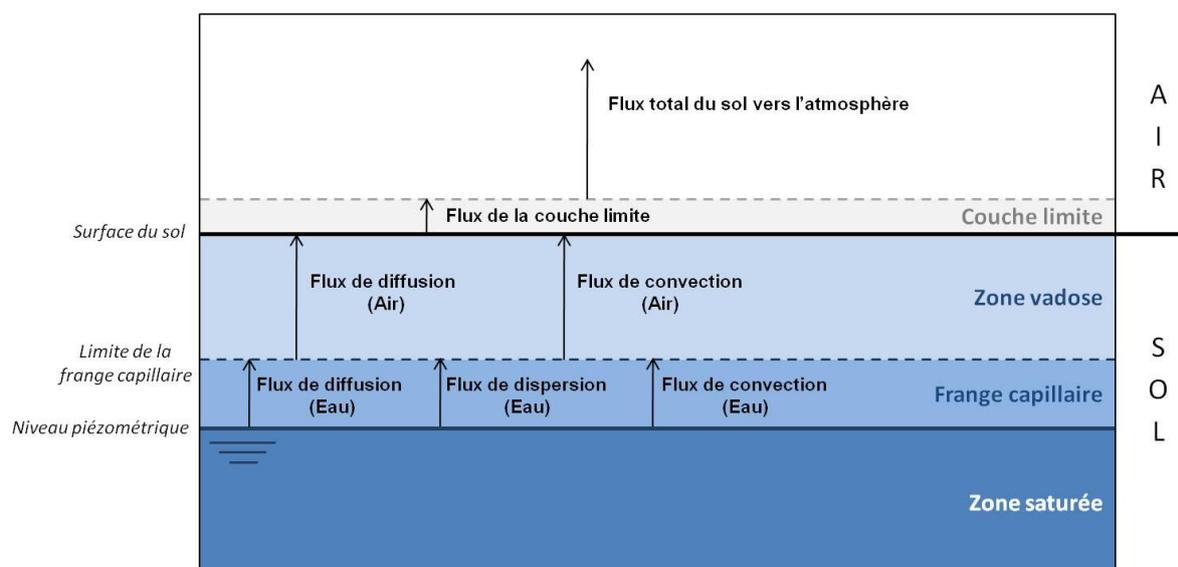


Figure 2 – Schématisation des flux de transport du sol vers l'air pour les composés volatils

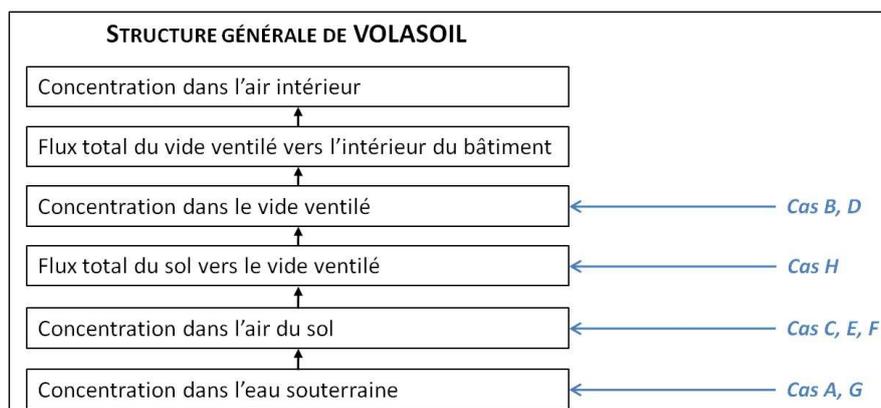


Figure 3 – Structure générale de VOLASOIL

B2-2.2 Cas A : Pollution de l'eau souterraine, système parfaitement mélangé

Le polluant est supposé dissous et réparti de manière homogène dans l'eau souterraine : la situation peut être vue comme une pollution homogène de l'eau souterraine (Figure 4) et les concentrations mesurées dans l'eau souterraine sont supposées représentatives de cette pollution homogène.

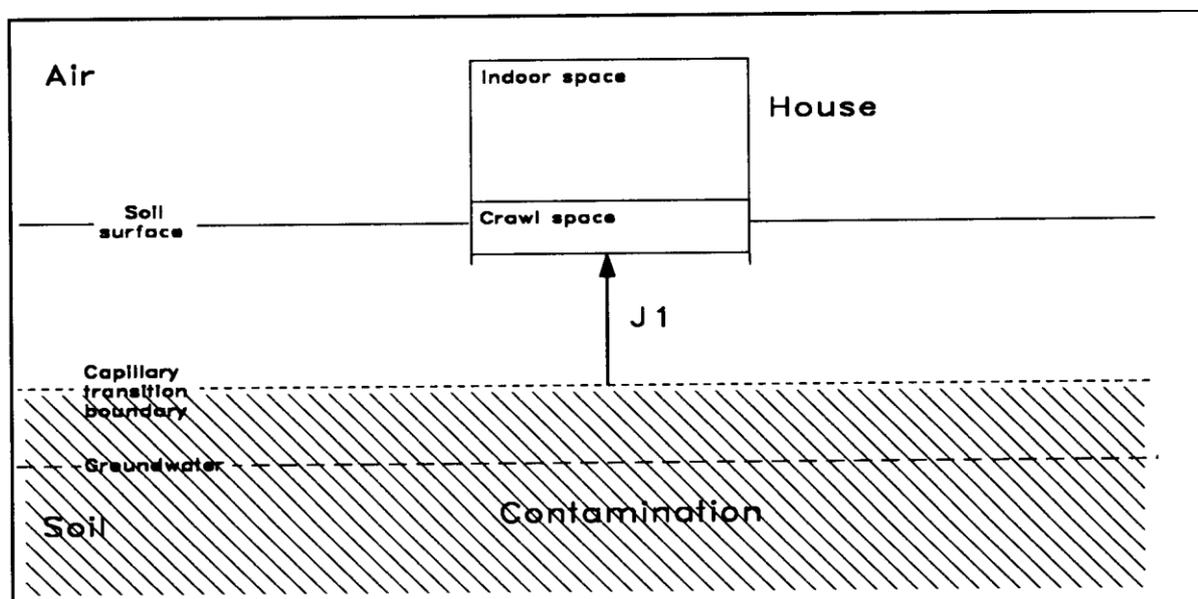


Figure 4 – Diagramme schématique d'une maison située sur un sol homogène avec des eaux souterraines polluées, en supposant un mélange homogène. J1 est le flux total de polluant du sol vers le vide ventilé.

Toutes les équations nécessaires au calcul des doses inhalées par volatilisation dans ce cas général sont reprises dans la section précédente (cf. B2-1).

B2-2.3 Cas B : Eau souterraine polluée dans le vide ventilé

Lorsque le niveau piézométrique est proche de la surface du sol, l'eau polluée peut s'introduire dans le vide ventilé par capillarité. La profondeur théorique de la limite de la frange capillaire est alors égale voire inférieure à la profondeur du vide ventilé sous la surface du sol. C'est par exemple le cas de la situation présentée à la Figure 5, où le niveau piézométrique se trouve au-dessus du niveau du sol dans le vide ventilé.

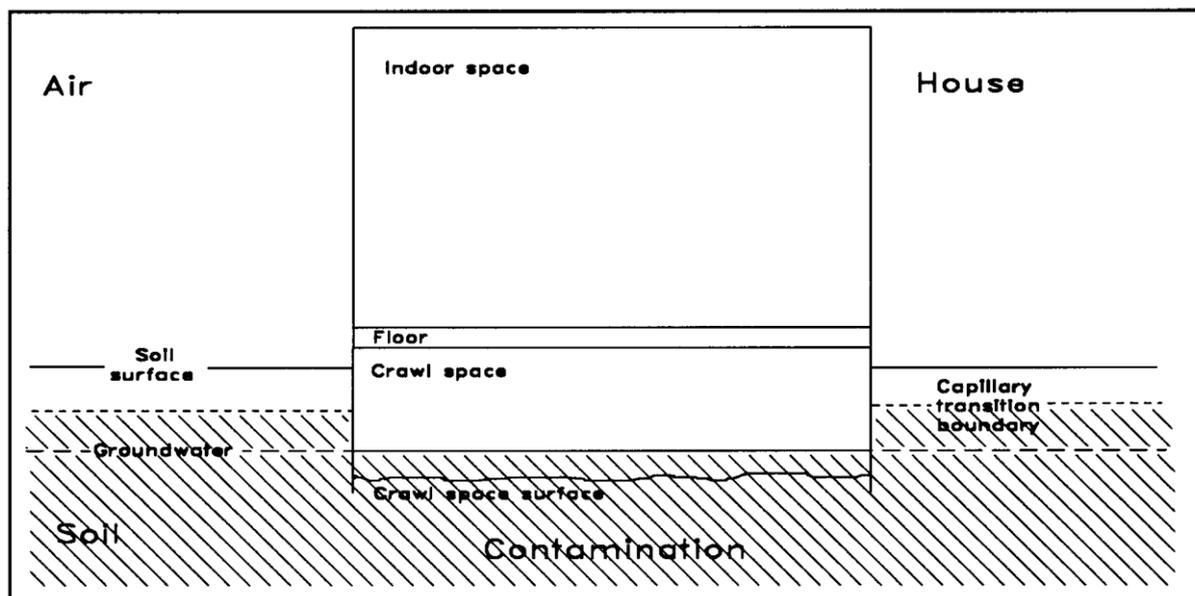


Figure 5 – Diagramme schématique d'une maison située sur un sol homogène avec des eaux souterraines polluées dans le vide ventilé.

La concentration dans l'air du vide ventilé (C_{ca}) est alors directement calculée à partir de la concentration dans l'eau du sol (ou dans l'eau souterraine) et du coefficient adimensionnel de Henry (K_{lw}) :

$$C_{ca} = K_{lw} * C_{sw}$$

C_{ca}	Concentration dans l'air du vide ventilé	$g.m^{-3}$
C_{sw}	Concentration dans l'eau du sol (ou dans l'eau souterraine)	$g.m^{-3}$
K_{lw}	Coefficient adimensionnel de Henry	-

B2-2.4 Cas C : Présence d'une couche surnageante (LNAPL)

En présence d'un LNAPL, une phase liquide non aqueuse flotte à la surface de l'eau souterraine. Il est supposé que cette couche flottante est située à la limite de la frange capillaire (Figure 6).

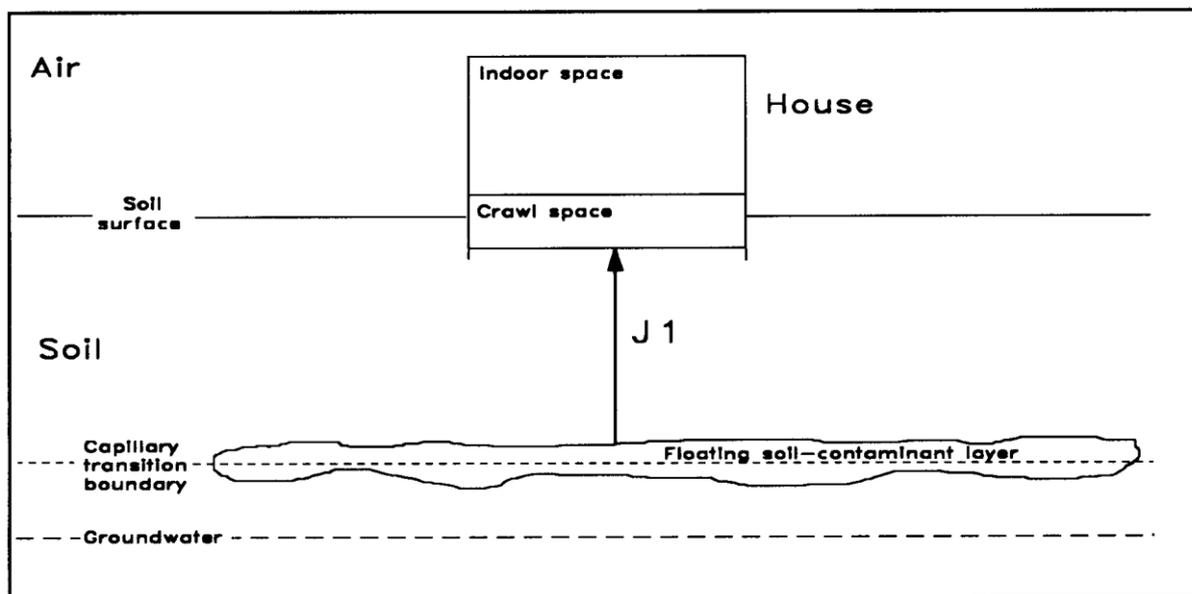


Figure 6 – Diagramme schématique d'une maison située sur un sol homogène dans le cas d'un LNAPL. J1 est le flux total de polluant du sol vers le vide ventilé.

A la profondeur correspondant à la limite de la frange capillaire, l'air du sol est saturé en polluant ; la concentration dans l'air du sol est donc calculée sur la base de la densité de vapeur maximale du polluant (Vd) à la température de 283K (Fetter, 1993).

$$Vd = Vp * M / (R * T)$$

$$Csa = Vd$$

Csa	Concentration dans l'air du sol	$g.m^{-3}$
Vd	Densité de vapeur	$g.m^{-3}$
Vp	Pression de vapeur	Pa
M	Masse moléculaire	$g.mol^{-1}$
R	Constante des gaz parfaits	$8.3144 Pa.m^3.mol^{-1}.K^{-1}$
T	Température	K

B2-2.5 Cas D : Eau souterraine polluée dans le vide ventilé et présence d'une couche surnageante

Un LNAPL peut également être présent lorsque la profondeur théorique de la limite de la frange capillaire est plus faible ou égale à la profondeur du vide ventilé sous le niveau du sol (Figure 7).

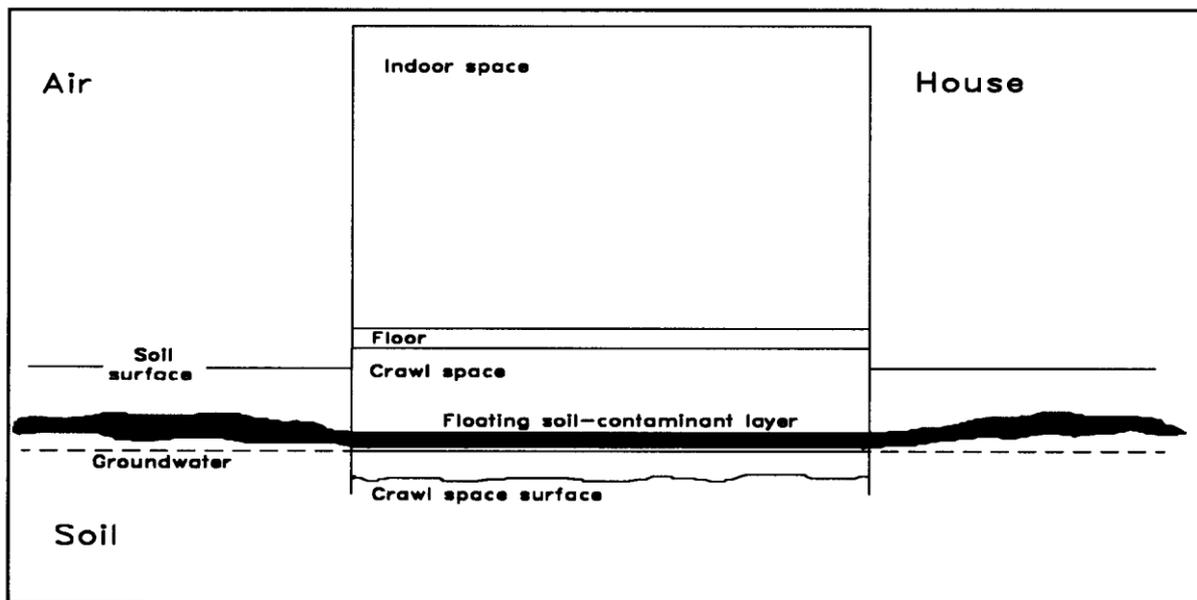


Figure 7 – Diagramme schématique d'une maison située sur un sol homogène dans le cas d'eaux souterraines et d'un LNAPL dans le vide ventilé.

La concentration dans l'air du vide ventilé est alors calculée comme étant égale à la densité de vapeur (cf. § B2-2.4).

$$C_{ca} = V_d$$

Cca	Concentration dans l'air du vide ventilé	$g.m^{-3}$
Vd	Densité de vapeur	$g.m^{-3}$

B2-2.6 Cas E : Présence de produit pur dans la zone vadose

Les polluants liquides plus denses que l'eau, comme le tétrachloroéthylène, peuvent être transportés à l'état de produit pur depuis la surface du sol jusqu'à la zone saturée. Dans la zone vadose, le flux vertical de polluants liquides peut être entravé par des aquitards ou aquicludes, comme des couches d'argile relativement imperméables, de la tourbe ou du terreau (Appelo & Postma, 1993). Dans ce cas, une couche de produit pur est présente dans la zone vadose (Figure 8), et l'air du sol est supposé saturé en ce polluant.

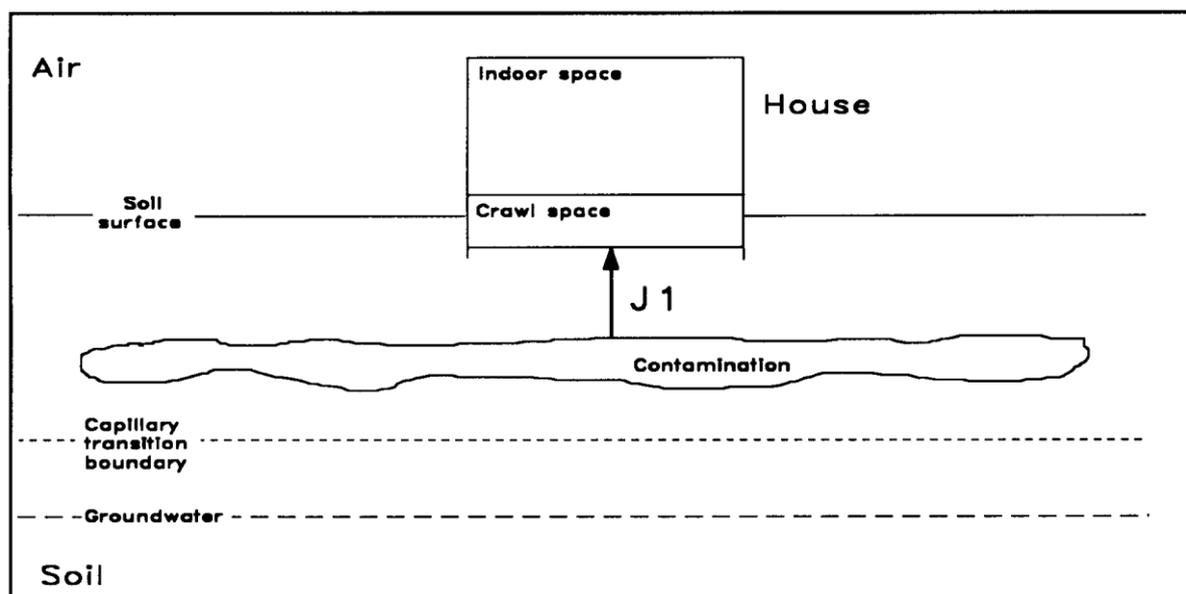


Figure 8 – Diagramme schématique d'une maison située sur un sol homogène, avec un produit pur dans la zone capillaire non saturée. J1 est le flux total de polluant du sol vers le vide ventilé.

La concentration dans l'air du sol à la profondeur de la pollution est donc calculée sur la base de la densité de vapeur maximale du polluant (cf.§ B2-2.4).

$$C_{sa} = V_d$$

C _{sa}	Concentration dans l'air du sol	g.m ⁻³
V _d	Densité de vapeur	g.m ⁻³

B2-2.7 Cas F : Pollution d'une nappe profonde

Lorsque le niveau piézométrique est très profond (Figure 9), il peut s'avérer difficile d'obtenir les concentrations dans l'eau souterraine à coût raisonnable. Dans ce cas, la concentration dans l'air du sol à une profondeur donnée (soit D_p , la profondeur moyenne de la pollution) peut être utilisée comme donnée d'entrée de VOLASOIL.

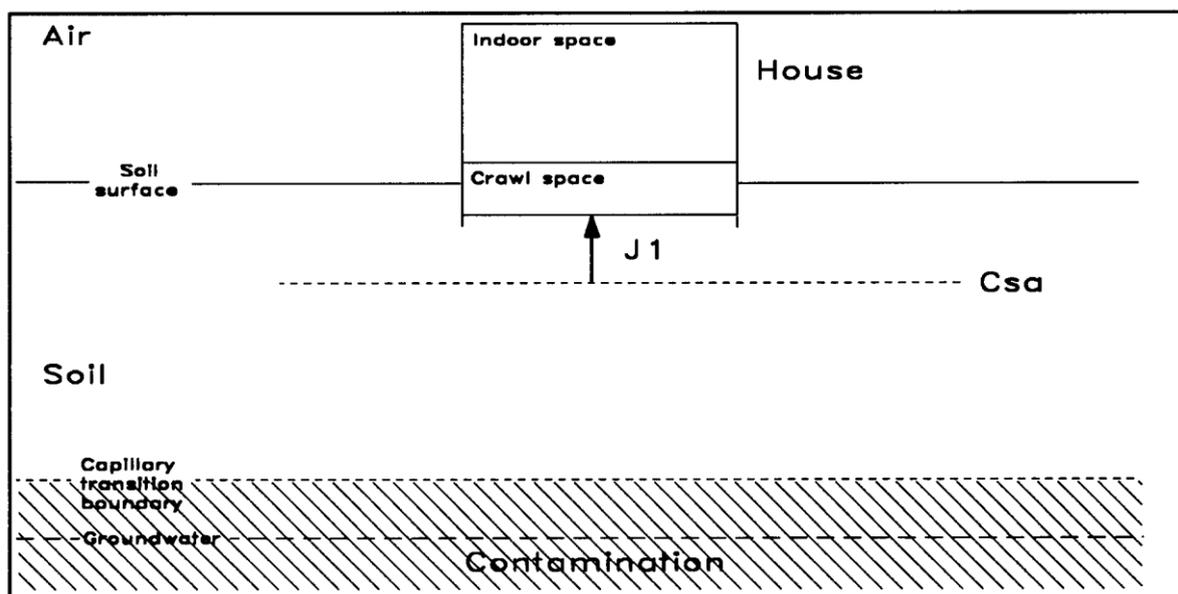


Figure 9 – Diagramme schématique d'une maison située sur un sol homogène dans le cas d'un niveau piézométrique très profond. $J1$ est le flux total de polluant du sol vers le vide ventilé ; Csa est la concentration dans l'air du sol à une profondeur donnée.

La concentration dans l'air du sol (Csa) peut, quant à elle, être obtenue :

- soit à partir de mesures du gaz du sol ;
- soit par calcul à partir du contenu du sol (Ct) à l'aide des équations de fugacité. A noter que cette méthode ne garantit pas la précision des prédictions.

B2-2.8 Cas G : Présence d'une phase liquide non aqueuse plongeante (DNAPL), système parfaitement mélangé

En présence d'un DNAPL (Figure 10), une phase liquide non aqueuse peut exister en dessous de la partie supérieure de la zone saturée – limitée en sa base par un aquitard ou aquiclude tel qu'une couche d'argile, de tourbe ou de terreau (Apelo & Postma, 1993).

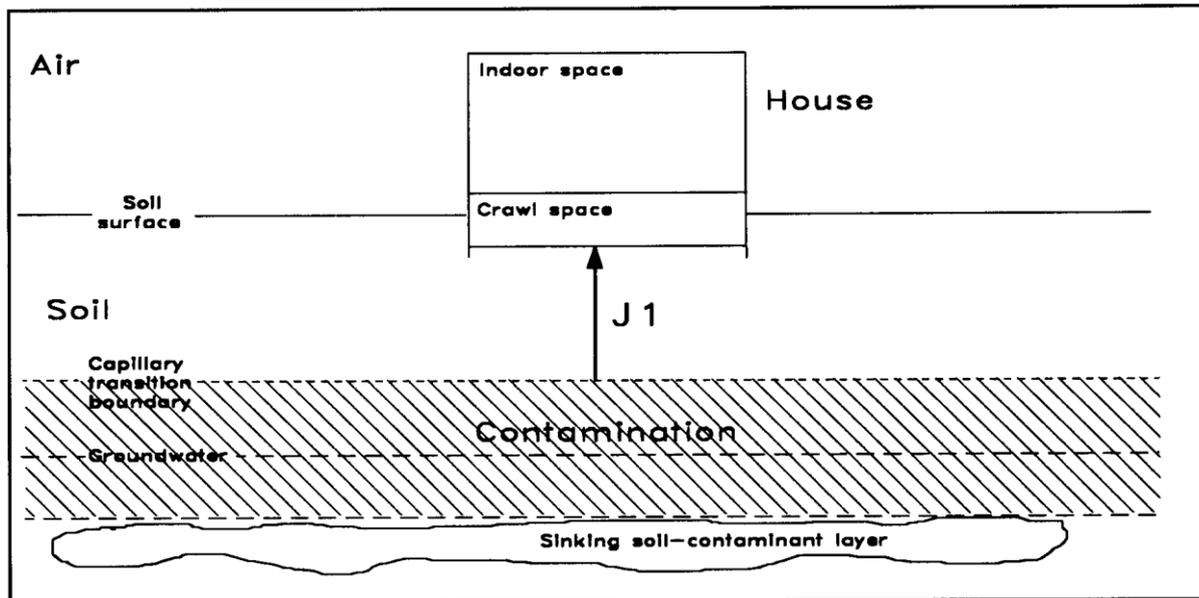


Figure 10 – Diagramme schématisant d'une maison située sur un sol homogène dans le cas d'un DNAPL, en supposant que la nappe est homogène. J1 est le flux total de polluant du sol vers le vide ventilé.

En supposant que l'état est stable, la concentration dans l'eau souterraine est en équilibre avec le DNAPL. La concentration dans l'eau du sol à la limite de la frange capillaire est supposée être égale à la concentration dans l'eau souterraine, mais toutefois inférieure à la concentration dans le DNAPL. Dès lors, la concentration mesurée dans l'eau souterraine peut être utilisée comme donnée d'entrée de VOLASOIL.

Afin de calculer les flux de polluant, la profondeur moyenne de la pollution (D_p) doit être égale à la profondeur de la limite de la frange capillaire.

B2-2.9 Cas H : Source de pollution située en dessous du niveau piézométrique, système non parfaitement mélangé

Lorsque qu'une source de pollution est mise en évidence en dessous du niveau piézométrique, les flux de transport dans la zone vadose seront limités par le flux de polluant atteignant la frange capillaire. En effet, dans une telle situation, la nappe ne peut être considérée comme homogène ; le flux d'eau est supposé nul et seuls les flux de diffusion des polluants dans l'eau souterraine et dans la frange capillaire sont considérés pour le calcul du flux total de polluant arrivant dans le vide ventilé (Figure 11). Dans la zone vadose, le transport des composés volatils du sol vers le vide ventilé est une combinaison des flux de convection et de diffusion¹⁰.

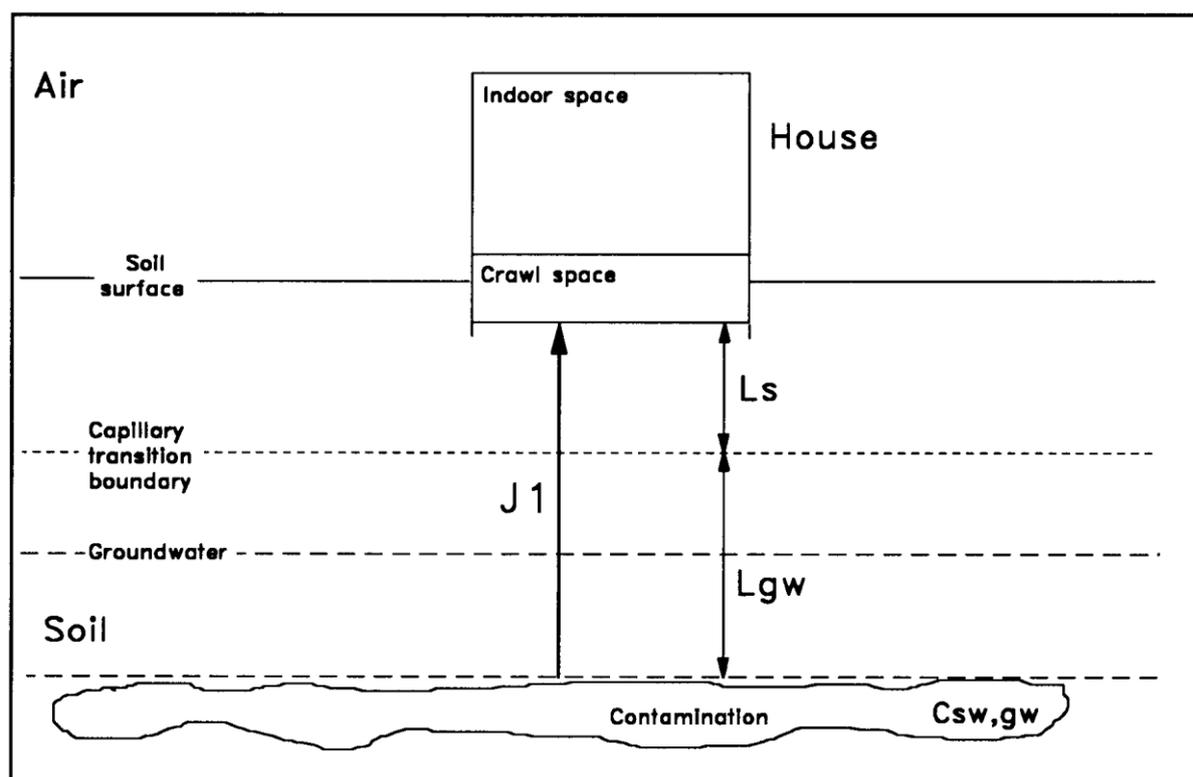


Figure 11 – Diagramme schématisé d'une maison située sur un sol homogène dans le cas d'une source de pollution située sous le niveau piézométrique ; la nappe est donc considérée comme hétérogène. J_1 est le flux total de polluant du sol vers le vide ventilé ; L_s est la longueur de la colonne de sol ; L_{gw} est la longueur de diffusion de la colonne d'eau souterraine ; $C_{sw,gw}$ est la concentration dans l'eau du sol à la profondeur de la source (dans l'eau souterraine).

Le flux de diffusion des composés volatils dans l'eau souterraine, à partir d'une source située sous le niveau piézométrique, vers la limite de la frange capillaire ($J_{d,gw}$), est calculé en supposant que la concentration dans l'air du sol (C_{sa}) est en équilibre avec la concentration dans l'eau du sol ($C_{sw,ctb}$). La longueur de diffusion de la colonne d'eau souterraine (L_{gw}) est calculée à partir de la profondeur de la source de pollution ($d_{s,gw}$) et de la hauteur de la frange capillaire (z).

$$J_{d,gw} = D_{sw} * (C_{sw,gw} - C_{sw,ctb}) / L_{gw}$$

¹⁰ Dans le cas où le flux de convection dans l'air du sol est nul, la seule force motrice pour le transport des composés volatils du sol vers le vide ventilé est la diffusion, dans l'eau souterraine puis dans l'air du sol.

$$L_{gw} = d_{s,gw} + z$$

Jd,gw	Flux de diffusion dans l'eau souterraine à partir d'une source située sous le niveau piézométrique, vers la limite de la frange capillaire	$\text{g.m}^2.\text{h}^{-1}$
Dsw.	Coefficient de diffusion dans l'eau du sol	$\text{m}^2.\text{h}^{-1}$
Csw,gw	Concentration dans l'eau du sol à la profondeur de la source dans la zone saturée	g.m^{-3}
Csw,ctb	Concentration dans l'eau du sol à la limite de la frange capillaire	g.m^{-3}
Lgw	Longueur de diffusion de la colonne d'eau souterraine	m
d _{s,gw}	Profondeur de la source de pollution en dessous du niveau piézométrique	m
z	Hauteur de la frange capillaire	m

B2-3 Références

- Appelo, C.A.J., Postma, D. (1993). *Geochemistry, groundwater and pollution*. A.A. Balkema, Rotterdam
- Fetter, C.W. (1993). *Contaminant hydrology*. Macmillan Publ. Co., New York, NY
- Baes, C.F., Sharp, R.D, Sjoreen, A.L. & Shor R.W (1984). A review and analysis of parameters for assessing transport of environmentally released radionuclides through agriculture. Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge. Tennessee.
- Briggs, G.C., Bromilow, R.H. & Evans, A.A. (1982). Relationships between lipophilicity and root uptake of non-ionised chemicals by Barley. *Pestic. Sci.*, 13, 495-504.
- Briggs, G.C., Bromilow, R.H., Evans, A.A. & Williams, M. (1983). Relationship between lipophilicity and the distribution of non-ionised chemicals in Barley shoots following uptake by the roots. *Pestic. Sci.*, 14, 492-500.
- Fiserova-Bergerova, V., Pierce, J. T. and Droz, P. O. (1990). Dermal absorption potential of industrial chemicals: Criteria for skin notation. *American Journal of Industrial Medicine*, 17: 617–635.
- INERIS. (2005), Etude des modèles d'évaluation de l'exposition et des risques liés aux sols pollués. Modélisation du transfert de vapeurs du sous-sol ou du vide sanitaire vers l'air intérieur. Rapport d'étude INERIS DRC-05-57278-DESP/R03a du 15/04/2005, 16 p.
- Jury, W.A., Spencer, W.F., Farmer, W.J. (1983). Behaviour assessment model for trace organics in soil: I. Model description. *J. Environ. Qual.* 12: 1445-1452
- Jury, W.A., Spencer, W.F., Farmer, W.J. (1984). Behaviour assessment model for trace organics in soil: IV. Review of experimental evidence. *J. Environ. Qual.* 13: 580-586
- Kliest, J.J.G. (1990). Vaststelling van de potentiële en actuele inhalatoire blootstelling als gevolg van bodemverontreiniging. RIVM, Bilthoven, The Netherlands. Report no. 725201004
- Mackay, D., Paterson, S., Cheung, B., Neely, W. (1985). Evaluating the environmental behaviour of chemicals with a level III fugacity model. *Chemosphere*, v.14, no. 3/4 : 335-374
- McKone, T.E & Maddalena, R.L. (2007). Plant uptake of organic pollutants from soil : Bioconcentration estimates based on models and experiments. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 26 (12) : 2494-2504.
- Travis, C.C, Arms, A.D. (1988). Bioconcentration in Beet, Milk and Vegetation. *Environ. Sc. Technol.* 22(3) : 271-274.
- US EPA (2004). Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS) Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment)-Final – Report EPA/540/R/99/005, Office of Superfund Remediation and Technology Innovation U.S. Environmental Protection Agency Washington, DC.
- Vonk, M.W. (1985). Permeation of Organic Compounds Through Pipe Materials, Pub. # 85, KIWA, Neuwegein, Netherlands.
- Waitz, M.F.W., Freijer, J.I., Kreule, P., Swartjes, F.A. (1996). The VOLASOIL risk assessment model based on CSOIL for soils contaminated with volatile compounds, RIVM, may 1996,189p.
- Wolff, C.J.M., van der Heide, H.B. (1982). A model to assess the rate of evaporation of chemical compounds from surface waters. *Chemosphere*, 11 No .2: 103 -117.