

ANNEXE C-2 : Méthodologie générale pour l'ajustement des VSN et VLN au stade de l'évaluation des risques de 1er niveau (ESR-N lessivage).

Version 6.0



Table des matières

1	Objet de l'annexe	3
2	Principes	3
3	Méthode d'ajustement des VS_N et VL_N	3
4	Détail de la procédure	4
4.1	Equation générale.....	4
4.2	Ajustement du Facteur de Dilution (FD)	4
4.2.1	Ajustement du facteur de dilution FD par analogie avec les valeurs applicables pour les principaux aquifères	5
4.2.2	Ajustement du facteur de dilution FD par calcul	5
4.3	Ajustement du facteur de redistribution massique (F_v)	9
4.4	Ajustement du facteur de partition sol/eau (K_{sw}).....	10
4.4.1	Coefficient de partition sol/eau corrigé (K_{dcor}).....	11
4.4.2	Paramètre Alpha (α)	11
5	Outil d'ajustement des VS_N et VL_N	11

1 OBJET DE L'ANNEXE

La présente annexe a pour objet de présenter la méthodologie générale pour l'ajustement des valeurs limites VS_N et VL_N . L'information reprise est issue des documents rédigés dans le cadre de l'établissement d'une réglementation relative à l'assainissement des sols pollués en Région wallonne, notamment :

- SPAQuE (2004). *Procédure de calcul des normes pour le sol: valeur de référence (VR), valeur seuil (VS) et valeur d'intervention (VI). PARTIE VI: Procédure de calcul des valeurs seuil (VS_N) et valeurs d'intervention (VI_N) fondées sur la protection des eaux souterraines. Document de consultation SPAQuE. (version Mars 2004)*

2 PRINCIPES

L'ajustement de VS_N et VL_N se base sur l'ajustement des principaux paramètres intervenant dans le calcul du facteur d'atténuation global FAG (cf. annexe C-1, section 3). Il s'agit :

- du facteur de dilution (**FD**), qui s'ajuste sur base des caractéristiques élémentaires du site et de la nappe suivantes : conductivité hydraulique, épaisseur de mélange, gradient hydraulique, longueur de la zone polluée et valeur de l'infiltration nette annuelle;
- du facteur de redistribution massique dans la zone vadose (**F_v**), qui peut être défini spécifiquement pour le terrain considéré sur base de l'épaisseur de la zone tampon (éventuellement) encore présente entre les couches de sol polluées et le toit de la nappe;
- du facteur de partition sol/eau (**K_{sw}**), qui s'établit suivant les coefficients de partition sol/eau K_d estimés pour le terrain considéré (K_d in situ) soit indirectement à partir des propriétés du sol (pH, teneur en argile, teneur en matière organique, proportion du volume de sol occupée par la charge caillouteuse) soit au départ de mesures ou tests spécifiques.

La discussion ci-dessous mentionne uniquement VS_N mais est applicable à la VL_N également lorsque VS_{nappe} est remplacée par VL_{nappe} .

3 MÉTHODE D'AJUSTEMENT DES VS_N ET VL_N

Pour l'ajustement des VS_N et des VL_N , deux méthodes peuvent être utilisées par l'expert en fonction des données à sa disposition :

- soit par type d'aquifère. Dans ce cas, des paramètres par défaut relatifs au sol standard et au type de nappe choisi sont retenus ; soit par calcul complet. Cette méthode implique que l'expert dispose de données ou de mesures particulières au site d'étude pour les paramètres utiles au calcul des facteurs FD (épaisseur de l'aquifère, infiltration, conductivité hydraulique, gradient hydraulique, longueur de la zone contaminée parallèle au flux souterrain) et K_{sw} (pierrosité, densité du sol,...). Toutes les données ou mesures entrées dans le calcul doivent faire l'objet d'une justification. A défaut de données ou de mesures sur certains paramètres, des valeurs par défaut (dépendantes du type d'usage ou du type de nappe) peuvent être utilisées.

Dans tous les cas, au minimum, les paramètres suivants doivent être ajustés sur base de mesures ou données de terrain et moyennant justification :

- type d'aquifère
- pH du sol (pH eau)
- Matière organique (MO)
- Profondeur de la nappe (dv)

4 DÉTAIL DE LA PROCÉDURE

4.1 EQUATION GÉNÉRALE

L'ajustement de la VS_N se base sur la relation suivante:

$$VS_{N,ajustée} = VS_{\{nappe\}} \times \left(\frac{1}{1000} \right) \times \frac{FD_{ajusté}}{F_{v,ajusté} \times K_{sw,ajusté}} \quad \text{Equation 1}$$

Avec :

- $VS_{N,ajustée}$: valeur seuil générique pour le sol, préventive des risques de lessivage et ajustée aux conditions du site [mg/kg M.S.]
- $VS_{\{nappe\}}$: valeur seuil pour la nappe [$\mu\text{g/l}$]
- $FD_{ajusté}$: facteur de dilution ajusté au type d'aquifère du site étudié [-]
- $F_{v,ajusté}$: facteur de redistribution massique dans la zone vadose [-]
- $K_{sw,ajusté}$: facteur de partition sol/eau ajusté [kg/l]

4.2 AJUSTEMENT DU FACTEUR DE DILUTION (FD)

Le facteur de dilution est obtenu par la relation suivante :

$$FD = 1 + \frac{d_{zm} \times K \times \nabla H}{I \times L} \quad \text{Equation 2}$$

Avec :

- FD : facteur de dilution [-]
- d_{zm} : épaisseur de la zone de mélange [m]
- K : conductivité hydraulique [m/an]
- ∇H : gradient hydraulique [-]
- L : Longueur de la zone contaminée parallèle au flux souterrain [m]
- I : Infiltration efficace annuelle [m/an]

Dans le cadre de la détermination VS_N et VL_N , le FD a été fixé par défaut à une valeur unique de 30.

Dans le cadre de l'ESR, pour l'ajustement du facteur de dilution FD , on pourra procéder :

- soit par analogie, en se référant aux valeurs moyennes obtenues pour les 6 grands types d'aquifères (cf. ci-dessous) ;
- soit par calcul, en se référant aux valeurs des paramètres d_{zm} , K , ∇H , L et I applicables pour le terrain étudié (cf. ci-dessous).

4.2.1 AJUSTEMENT DU FACTEUR DE DILUTION FD PAR ANALOGIE AVEC LES VALEURS APPLICABLES POUR LES PRINCIPAUX AQUIFÈRES

Le facteur FD peut être défini d'après le type de nappe en se référant aux valeurs tabulées ci-dessous établies pour les principaux aquifères de la Wallonie (valeurs de FD_{moyen} établies par calcul sur base de données recueillies dans le cadre d'études hydrogéologiques) :

Type d'aquifère	Lithologie	FD_{moyen} [-]
Nappe alluviale	Graviers	108
Nappe du Crétacé de Hesbaye	Craies	12
Nappe du Bruxellien	Sables	72
Nappe calcaire	Calcaires	33
Nappe du Sinémurien	Sables et grès	24
Nappe des schistes et grès	Schistes et grès	13
Nappe non exploitable	-	12

Tableau 2-1 : Valeurs du paramètre FD_{moyen} par type d'aquifère

Le $FD_{ajusté}$ est égal au FD_{moyen} du type d'aquifère de référence se rapprochant le mieux de la nappe présente au droit de la contamination.

Pour les nappes non exploitables, la valeur du facteur de dilution applicable est par défaut fixé à la valeur minimale obtenue pour les 6 aquifères de référence, à savoir 12.

4.2.2 AJUSTEMENT DU FACTEUR DE DILUTION FD PAR CALCUL

L'expert peut déterminer le FD propre aux conditions du site sur base de l'équation générale donnée ci-dessus (Equation 2). Dans ce cas :

- l'expert devra justifier du caractère représentatif des valeurs utilisées pour chacun des paramètres intervenant dans l'équation ;
- au minimum les paramètres L et ∇H devront être issus des mesures effectuées sur le terrain.

Les lignes directrices à suivre pour la sélection des valeurs applicables pour les différents paramètres sont données ci-dessous.

Notons que dans le cas d'un ajustement des VS_N et VL_N par calcul complet, la borne inférieure de FD est fixée à 12 ce qui correspond au FD d'une nappe non-exploitable.

4.2.2.1 Épaisseur de mélange (d_{zm})

- Pour des aquifères épais (> 2m): il est recommandé d'établir l'épaisseur de mélange (d_{zm}) d'après les équations suivantes, qui considèrent distinctement l'importance relative de la profondeur de mélange due à la dispersivité verticale (d_{av}), et celle due au déplacement de l'eau dans l'aquifère (d_{lv}) :

$$d_{zm} = d_{av} + d_{lv} \quad \text{Equation 3}$$

$$d_{zm} = (2 \times \alpha_z \times L)^{0.5} + d_a \left\{ 1 - \exp \left[\frac{(-L \times I)}{K \times \nabla H \times d_a} \right] \right\} \quad \text{Equation 4}$$

Paramètres	Signification	Unités	Spécificité	Source d'information
d_{av}	Profondeur de mélange due à la dispersivité verticale	m	site	Calcul
d_{lv}	Profondeur de mélange due au déplacement de l'eau dans l'aquifère	m	site	Calcul
α_x	Dispersivité longitudinale	m	site	$\alpha_x = 0.1 \times L$ Equation 5 ¹
α_z	Dispersivité verticale	m	site	$\alpha_z = 0.056 \times \alpha_x$ Equation 6 ²
d_a	Épaisseur de l'aquifère	m	site	Mesure
K	Conductivité hydraulique de l'aquifère	m/an	site	Valeur par défaut (cf. Tableau 2-3) ou mesure (cf. 0)
∇H	Gradient hydraulique	m/m	site	Mesure (cf. 4.2.2.3)
I	Infiltration efficace annuelle	m/an	site	Valeur par défaut (cf. Tableau 2-4) ou mesure (cf. 4.2.2.4)
L	Longueur de la zone contaminée parallèle au flux souterrain	m	site	Mesure (cf. 4.2.2.5)

Tableau 2-2 : Paramètres requis pour le calcul de l'épaisseur de la zone de mélange d_{zm} pour des aquifères épais (> 2m)

Pour la définition des paramètres requis au calcul de l'épaisseur de mélange (d_{zm}), il y a lieu :

- de considérer une valeur par défaut pour la dispersivité longitudinale α_x ³ ;
- de mesurer l'épaisseur de l'aquifère d_a via les informations hydrogéologiques déduites des piézomètres de reconnaissance ;
- de mesurer la conductivité hydraulique K à l'aide d'essais de pompages (alternativement des valeurs par défaut par type de nappe peuvent néanmoins être utilisées) (cf. § 0),
- de mesurer le gradient hydraulique ∇H (cf. § 4.2.2.3),
- d'utiliser une valeur par défaut pour l'infiltration I (cf. § 4.2.2.4),
- de mesurer la longueur de la zone polluée parallèle au flux souterrain L (cf. § 4.2.2.5).

Cas particuliers :

- Pour des aquifères peu épais ($\leq 2m$): on pose comme hypothèse de travail que $d_{zm} = d_a$;
- Pour des aquifères dont l'épaisseur ne peut être établie : on prend comme valeur par défaut $d_{zm} = 2m$;
- Lorsque les paramètres requis pour le calcul de d_{zm} sont jugés fortement incertains : on prend comme valeur par défaut $d_{zm} = 2m$.

¹ Pickens and Grisak (1981), ASTM (1995), EPA (1986) cités dans Connor, J.A., R.L., Bowers, S.M., Paquette, C.J., Newell, (1997). Soil attenuation model for derivation of risk-based soil remediation standards. Groundwater Services, Inc., Houston, Texas, U.S., 34 pp.

² Gelhar & Axness (1981) cité dans Environmental Protection Agency (EPA) (1996).

³ A noter qu'au palier 2 une mesure la dispersivité longitudinale α_x pourra éventuellement s'effectuer par un essai de traçage.

4.2.2.2 Conductivité Hydraulique (K)

Il est recommandé, dans la mesure du possible, de se fonder sur la mesure effective de la conductivité hydraulique à l'aide de pompages d'essai⁴ (cf. annexe C-3.3. section 2).

Alternativement, des valeurs indicatives dépendantes de la formation géologique de référence ou du type d'aquifères en Wallonie sont disponibles et ont été établies par calcul sur base de données recueillies dans le cadre d'études hydrogéologiques⁵.

Ces valeurs pourront être utilisées par défaut au stade de l'ESR dans le cadre d'un ajustement par calcul complet.

Type d'aquifère	Lithologie	K _{moyen} (m/s)
Nappe alluviale	Graviers	1.00E-03
Nappe du Crétacé de Hesbaye	Craies	1.00E-04
Nappe du Bruxellien	Sables	5.00E-05
Nappe calcaire	Calcaires	1.00E-04
Nappe du Sinémurien	Sables et grès	1.00E-04
Nappe des schistes et grès	Schistes et grès	1.00E-05
Nappe non exploitable	-	-

Tableau 2-3 : Valeurs du paramètre K_{moyen} par type d'aquifère

4.2.2.3 Gradient Hydraulique (∇H)

Le gradient hydraulique pertinent pour la zone étudiée doit être établi sur base des données piézométriques relevées sur le site.

Le gradient hydraulique suit l'équation suivante :

$$\nabla H (-) = \frac{\Delta H}{L} \quad \text{Equation 7}$$

Avec :

- ΔH : Différence d'altitude de la nappe entre 2 points d'une même ligne de courant [m]
- L : Distance entre les deux points de mesure de l'altitude de la nappe [m]

⁴ En effet, la mise en œuvre ainsi que l'interprétation d'un pompage d'essai, n'induisent habituellement qu'un coût additionnel limité par rapport à la réalisation du piézomètre de reconnaissance, tout en permettant d'apprécier la distribution spatiale, au voisinage du panache de ce paramètre « directeur » de la migration d'un panache.

⁵ Selon les propositions formulées par la DGARNE et discutées lors des réunions du Groupe Thématique Eaux Souterraines dans le cadre des travaux pour l'élaboration du projet de décret relatif à l'assainissement des sols pollués.

La détermination correcte de ΔH requiert la réalisation d'un nombre suffisant de piézomètres. Un strict minimum de trois est requis pour préciser le plan associé à la surface piézométrique.

Pour la mesure du ΔH , il sera vérifié que :

- les coordonnées topographiques X, Y et Z auront été levées avec une précision :
 - $\leq 0,10$ m pour X et Y
 - $\leq 0,01$ m pour Z
- les crépines investiguent la même structure aquifère.

4.2.2.4 Infiltration efficace annuelle (I)

Les directives pour la détermination du paramètre I sont fournies à la section 1 de l'annexe C-3.4.

Alternativement, des valeurs indicatives dépendantes de la formation géologique de référence ou du type d'aquifères en Wallonie sont disponibles et ont été établies par calcul sur base de données recueillies dans le cadre d'études hydrogéologiques.

Ces valeurs pourront être utilisées par défaut au stade de l'ESR dans le cadre d'un ajustement par calcul complet.

Type d'aquifère	Lithologie	I _{moyen} (mm)
Nappe alluviale	Graviers	250
Nappe du Crétacé de Hesbaye	Craies	260
Nappe du Bruxellien	Sables	275
Nappe calcaire	Calcaires	240
Nappe du Sinémurien	Sables et grès	250
Nappe des schistes et grès	Schistes et grès	150
Nappe non exploitable	-	-

Tableau 2-4 : Valeurs du paramètre I_{moyen} par type d'aquifère

4.2.2.5 Longueur de la zone polluée (L)

Le paramètre L désigne la longueur de la zone polluée (zone vadose) dans la direction du flux souterrain.

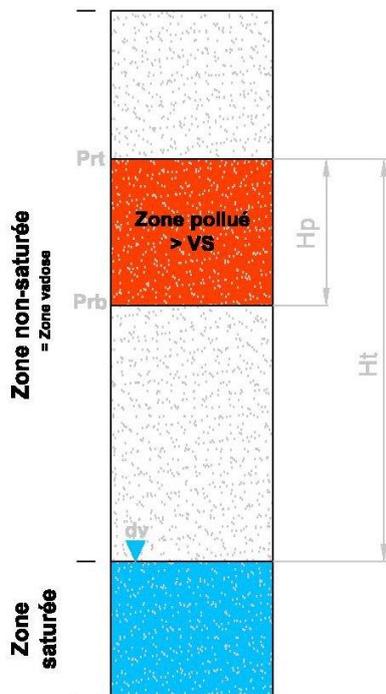
Les limites d'extension de la zone polluée seront fixées par jugement d'expert, en tenant compte notamment des sources de pollution, de la distribution des concentrations mesurées, et de valeurs de concentration de fond applicables.

Sans indication sur la longueur de la zone polluée (L), l'expert prendra la plus grande longueur du site (par exemple la diagonale si le site est un rectangle).

4.3 AJUSTEMENT DU FACTEUR DE REDISTRIBUTION MASSIQUE (F_v)

L'ajustement des VS_N et VL_N par type de nappe ou par calcul complet nécessite d'ajuster la valeur de F_v . Celle-ci doit être calculée pour chaque polluant sur base de la profondeur représentative du sol pollué et de la profondeur représentative de la nappe.

La VS du décret sol constitue le seuil au-delà duquel le sol est considéré comme pollué.



Le facteur de redistribution massique dans la zone non saturée (F_v) est calculé d'après :

$$F_v(-) = \frac{Hp}{Ht} \quad \text{Equation 8}$$

Avec :

- Hp : Épaisseur de la vadose contaminée [m]

$$Hp(m) = Prb - Prt \quad \text{Equation 9}$$

Avec :

Prb = Profondeur de la base de la contamination [m]

Prt = Profondeur du toit de la contamination [m]

- Ht : Épaisseur totale de la vadose sous la contamination [m]

$$Ht(m) = dv - Prt \quad \text{Equation 10}$$

Avec :

Prt = Profondeur du toit de la contamination [m]

dv = Profondeur représentative de la nappe [m]

Concrètement, au niveau de l'ESR :

- le facteur de distribution massique dans la zone non saturée (F_v) s'ajuste par l'encodage obligatoire de la donnée de la profondeur de la nappe (dv) ;
- les profondeurs Prb et Prt , dites profondeurs représentatives, sont encodées, pour les polluants pertinents, en respectant les principes suivants :
 - le toit de la pollution (Prt) est fixé à la profondeur maximale du dernier échantillon non pollué sus-jacent à la pollution, ou, à défaut, à la surface du sol ;
 - la base de la pollution (Prb) est fixée à la profondeur minimale du premier échantillon non pollué sous-jacent à la pollution ou, à défaut, au niveau de la nappe.

4.4 AJUSTEMENT DU FACTEUR DE PARTITION SOL/EAU (K_{sw})

L'ajustement des VS_N et VL_N par type de nappe ou par calcul complet nécessite d'ajuster la valeur de K_{sw} .

Le facteur de partition sol / eau (K_{sw}) est défini par l'expression générale suivante :

$$K_{sw} (kg/l) = \frac{1}{\left[K_{dcor} + \frac{\theta_v + \theta_g H'}{\rho_b} \right]} \quad \text{Equation 11}$$

Avec :

- K_{dcor} [L/kg] : est le coefficient de partition sol – eau (K_d) corrigé et établi selon une des méthodes présentées à l'annexe C-3-1.

La correction tient compte de la pierrosité estimée du sol pour la zone étudiée qui réduit la fraction des sites disponibles pour l'adsorption (f_{ads}).

$$K_{dcor} = K_d \times f_{ads} \quad \text{Equation 12}$$

Avec :

- K_{dcor} = Coefficient de partition sol/eau corrigé [l/kg]
- K_d = Coefficient de partition sol/eau (spécifique au contaminant) [l/kg]
- $f_{ads} = 1 - (\text{Pierrosité}/100)$ [-] Equation 13
- Pierrosité = Fraction granulométrique > 2 mm [%] ⁶ Equation 14

- $\frac{\theta_v + \theta_g H'}{\rho_b} = \alpha$ Equation 15

Avec :

- θ_v = teneur volumique en eau [-]
- θ_g = teneur volumique en air [-]
- ρ_b = densité apparente du sol à l'état sec [kg/dm³]
- H' = constante d'Henry adimensionnelle (spécifique au contaminant) [-]

Et :

- $\theta_v = f \times \left(1 - \frac{\rho_b}{2,6}\right)$ Equation 16

- $\theta_g = \left(1 - \frac{\rho_b}{2,6}\right) - \theta_v$ Equation 17

⁶ On se référera préférablement à des analyses granulométriques et le cas échéant, aux descriptions des logs de forages.

Les valeurs par défaut des paramètres qui ont servi au calcul du facteur de partition sol/eau (K_{sw}) dans le cadre de la détermination des VS_N et VL_N sont présentées au tableau 1-2 de la section 3.2 de l'annexe C-1.

4.4.1 COEFFICIENT DE PARTITION SOL/EAU CORRIGÉ (K_{DCOR})

Pour l'ajustement des VS_N et VL_N :

- La valeur du coefficient de partition K_d doit être établie selon une des méthodes présentées à l'annexe C-3-1 et en respectant les prescriptions formulées en ce qui concerne les règles pour l'ajustement du paramètre en fonction des propriétés des sols ;
- Pour le calcul de K_{dcor} :
 - La correction par la pierrosité ne doit pas être effectuée si, selon la méthode retenue pour établir le coefficient de partition K_d (cf. annexe C-3.1.), la pierrosité a déjà été prise en compte (exemple : K_d estimé d'après une méthode in situ où les concentrations totales du sol se rapportent bien à l'ensemble de l'échantillon, pierrosité incluse. Dans ce cas $K_{dcor} = K_d$ estimé in situ ;
 - « Pierrosité » ne peut être ajusté dans un sens moins contraignant (pierrosité plus faible que celle considérée par défaut d'après le tableau 1-2 de l'annexe C-1) que si l'expert dispose de données d'observation (pierrosité rapportée dans les log de forages) ou de mesures fiables et représentatives de la situation étudiée (unité spatiale d'analyse). Dans le cas contraire, les valeurs par défaut sont utilisées.

4.4.2 PARAMÈTRE ALPHA (α)

Dans le cas des polluants volatils ou semi-volatils, la valeur de α – équation 15 - peut être calculée avec les valeurs par défaut des paramètres Θ_v , Θ_g et ρ_b telles que fixées pour l'établissement des normes (tableau 1-2 de l'annexe C-1), ou avec d'autres valeurs des paramètres fixées par référence aux directives fournies à la section 2 de l'annexe C-3.4 (pour Θ_v) et aux directives de la section 2 de l'annexe C-3.6 (pour ρ_b).

En l'absence de coefficient de Henry adimensionnel H' pour les métaux lourds, le terme α a été fixé à 0.153.

5 OUTIL D'AJUSTEMENT DES VS_N ET VL_N

Pour réaliser les calculs d'ajustement des VS_N et VL_N par type de nappe ou par calcul complet, une feuille de calcul excel® est mise à disposition par la DPS.

Dans le cadre d'un ajustement des VS_N et/ou VL_N , l'expert devra fournir à l'Administration l'ensemble des valeurs utilisées pour l'ajustement des paramètres FD , Fv et K_{dcor} , avec leur justification. A cet effet la feuille de calcul excel® devra être imprimée (fonction prévue à cet effet sur la feuille).