



**Caractérisation des risques associés aux dépôts de cendres retrouvés au pied de la décharge « Est » située le long de la RN22 à Bissen et établissement des meilleures alternatives techniques pour leur gestion**

**ETAPE 1 :**

***Caractérisation de la distribution spatiale des pollutions et étude préliminaire des risques***

**RAPPORT DE SYNTHÈSE**

**(N° dossier : RISC/14/016/ER-AEV-Bissen)**

**Commanditaire : S. Capus – Administration de l'Environnement – Grand-Duché de Luxembourg**

TYPE DE RAPPORT	VERSION	DATE DE REMISE	Contact
Rapport de synthèse	<i>Finale</i>	29/0/2016	Ram-Ses sprl Parc Créalys Résidence ALDEBARAN Rue Camille Hubert, 13-2è ét. B-5032 Les Isnes Tél. : 00 32 (0)81 73 50 96 Fax : 00 32 (0)81 73 50 99 <a href="http://www.ram-ses.eu">http://www.ram-ses.eu</a>



## PREAMBULE

*L'évaluation des risques pour la santé humaine et l'environnement est un outil d'aide à la décision au service des gestionnaires du risque basé sur des hypothèses simplificatrices, conduisant à des incertitudes sur les résultats. La présente évaluation des risques - basée sur la modélisation - a été effectuée dans les règles de l'art en utilisant les connaissances actuelles dans les domaines des investigations des sols, des eaux souterraines, des techniques et outils de modélisation disponibles à ce jour et de la toxicologie.*

*Les résultats décrits dans le présent rapport ont été obtenus sur la base des informations fournies à Ram-Ses s.p.r.l., des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives. La responsabilité de Ram-Ses s.p.r.l. ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.*

*Ram-Ses s.p.r.l., dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.*

Version 1.0	Date d'application : 07/08/2012	DOC_TRA_09 Rapport RISC
-------------	---------------------------------	-------------------------

## Table des matières

PREAMBULE .....	i
Table des matières .....	iii
Liste des annexes .....	iv
Liste des figures.....	v
Liste des tableaux.....	vi
Acronymes .....	vii
Résumé non technique.....	1
<b>1. Contexte et justification de l'étude .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Objectifs spécifiques et étapes de travail .....</b>	<b>5</b>
<b>3. Etudes antérieures .....</b>	<b>6</b>
<b>4. Campagne d'échantillonnage 2015 : sol, plantes et lombrics .....</b>	<b>7</b>
4.1 Prélèvements et analyses d'échantillons de sol .....	7
4.2 Prélèvements et analyses d'échantillons de plantes .....	9
4.3 Collecte et analyses de lombrics.....	10
<b>5. Résultats analytiques : concentrations en métaux lourds dans le sol, les plantes et les lombrics .....</b>	<b>10</b>
5.1 Echantillons de sol .....	10
5.1.1 Statistiques descriptives .....	10
5.1.2 Cas particulier des concentrations en zinc.....	10
5.1.3 Représentation spatiale des concentrations en métaux : visions 2D et 3D.....	12
5.1.4 Comparaison des concentrations mesurées aux valeurs ALEX 02 et teneurs habituelles dans les sols luxembourgeois.....	13
5.1.5 Résultats de la mesure de la fraction échangeable et de la concentration totale en zinc (KUL) .....	18
5.2 Echantillons de plantes .....	19
5.3 Echantillons de vers .....	21
<b>6. Délimitation de l'étendue de la couche de cendres.....</b>	<b>22</b>
6.1 Délimitation préliminaire de la couche de cendres sur base de l'examen visuel des échantillons prélevés.....	22
6.2 Délimitation de la couche de cendres sur base de l'étude des concentrations en zinc .....	23
6.3 Estimation de l'extension de la couche de cendres.....	27
<b>7. Caractérisation préliminaire des risques .....</b>	<b>29</b>
7.1 Hypothèses de travail et concentrations représentatives pour l'étude de risques .....	29
7.2 Risques pour la santé humaine .....	29
7.3 Risques pour les eaux souterraines et de surface .....	32
7.3.1 Méthodologie et hypothèses de travail .....	32
7.3.2 Résultats.....	34
7.4 Risques pour les écosystèmes .....	37
7.4.1 Modèle Conceptuel de Site préliminaire .....	37
7.4.1.1 Sources de pollution et concentrations représentatives .....	38
7.4.1.2 Cibles ou récepteurs écologiques .....	38
7.4.1.3 Voies de transfert /d'exposition .....	38
7.4.2 Etablissement des « Fractions Potentiellement Affectées » (FPA) (vision mono polluant) et interprétation.....	38
7.4.3 Etude de l'effet de plusieurs polluants par l'établissement de la « combi-FPA » .....	41
7.4.4 Interprétation des valeurs de concentration mesurées dans les végétaux et lombrics et maillons trophiques supérieurs (oiseaux et mammifères) .....	42
7.4.5 Prise en compte de la fraction biodisponible du en zinc .....	45
<b>8. Intégration des résultats, conclusions générales et recommandations .....</b>	<b>46</b>
8.1 Délimitation de la volumétrie de la couche de cendres.....	46
8.2 Résultats de l'étude de risques préliminaire .....	47
8.3 Recommandations techniques .....	47

## Liste des annexes

- ANNEXE 1 : Relevé topographique
- ANNEXE 2 : Reportage photographique – échantillonnage des 28 et 29 avril 2015 – Bissen – Décharge « Est »
- ANNEXE 3 : Description lithologique des forages
- ANNEXE 4 : Rapport du laboratoire ALcontrol : analyses de sol
- ANNEXE 5 : Représentation en 3D des concentrations en zinc, cuivre et cadmium dans le sol (+ Annexe électronique)
- ANNEXE 6 : Echantillons définis comme appartenant à la couche de cendres sensu stricto (N = 18)
- ANNEXE 7 : Représentation en 3D de la couche de cendres : approches réaliste et conservatoire (+ annexe électronique)
- ANNEXE 8 : Propriétés physico-chimiques du cadmium, du cuivre et du zinc utilisées pour l'évaluation des risques santé humaine.
- ANNEXE 9 : Profils en zone inondables (extrait du portail géographique luxembourgeois)
- ANNEXE 10 : Propriétés du sol, de la nappe et du zinc utilisées pour le calcul du temps de lessivage dans le logiciel F-LEACH
- ANNEXE 11 : Paramètres d'entrée et résultats de l'étude de la dispersion (tableaux de résultats du logiciel BIOSCREEN).
- ANNEXE 12 : Résultats de l'étude du lessivage (rapport du logiciel F-LEACH)

## Liste des figures

Figure 1 :	Zone d'échantillonnage. Extrait de la carte topographique (échelle 1/750) du site de la décharge de Bissen. ....	8
Figure 2 :	Zoom sur l'extrait de la Figure 1 rapportant les points de sondage d'avril 2015 ainsi que les points (M1 à M4) et piézomètres (FP1 à FP4) placés au cours des précédentes campagnes de sol. La ligne pointillée représente la limite du talus de la décharge. ....	8
Figure 3 :	Histogramme de répartition des concentrations en zinc dans le sol. ....	11
Figure 4 :	Histogramme de répartition des concentrations en zinc dans le sol : échantillons présentant une concentration inférieure à 2500 mg/kg (47 échantillons sur 65). ....	11
Figure 5 :	Carte des iso-concentrations en zinc. ....	12
Figure 6 :	Carte des iso-concentrations en cuivre. ....	12
Figure 7 :	Carte des iso-concentrations en cadmium. ....	13
Figure 8 :	Diagrammes de répartition des concentrations en fonction des propositions de Valeurs de Référence (VR) luxembourgeoises. ....	17
Figure 9 :	Concentration en zinc : fractions biodisponible et non-biodisponible (extrait des fractions de l'échantillon inférieures à 2 mm). ....	18
Figure 10 :	Comparaison des concentrations en métaux lourds (en mg/kg de matière sèche) dans les ficiaires ( <i>Ranunculus ficaria</i> ) prélevées dans les zones impactée et témoin. ....	20
Figure 11 :	Concentrations en métaux lourds (en mg/kg de matière brute) dans les lombrics et comparaison entre les zones impactée et témoin. ....	21
Figure 12 :	Coupe schématique A-A' Nord-Est/Sud-Ouest (partie basse du talus de la décharge). ....	22
Figure 13 :	Coupe schématique B-B' Nord-Ouest/Sud-Est (axe parallèle à la limite du talus). ....	23
Figure 14 :	Distribution des concentrations en zinc ( <i>Normal Quantile Plot</i> et histogramme) dans le sol (mg/kg MS) (N = 65). ....	24
Figure 15 :	Résultat du test de normalité réalisé sur l'ensemble des échantillons (N = 65). ....	24
Figure 16 :	Distribution des logarithmes de concentrations en zinc 'hors couche de cendres' (N = 32) et résultat du test de normalité (Test de Shapiro-Wilk). ....	25
Figure 17 :	Distribution des logarithmes de concentrations en zinc 'couche de cendres' (N = 33) et résultat du test de normalité (Test de Shapiro-Wilk). ....	25
Figure 18 :	Test de comparaison des moyennes des logarithmes de concentrations en zinc (test de Welch) : 'couche de cendres' (N = 33) versus 'hors couche de cendres' (N = 32). ....	26
Figure 19 :	Concentrations en zinc (cercles pleins noirs dont la taille est directement proportionnelle à la concentration) et identification des échantillons selon l'approche conservatoire (cercles verts). La ligne en pointillé noire représente la délimitation de la base du talus de la décharge. ....	28
Figure 20 :	Concentrations en zinc (cercles pleins noirs dont la taille est directement proportionnelle à la concentration) et identification des échantillons selon l'approche réaliste (losanges orange). La ligne en pointillé noire représente la délimitation de la base du talus de la décharge. ....	28
Figure 21 :	Représentation des zones inondables au droit du terrain étudié selon une probabilité moyenne (en bleu, HQ100 – carte tirée de <a href="http://www.geoportail.lu">www.geoportail.lu</a> ), et localisation du dépôt de cendres présentes en surface d'après le rapport Luxcontrol (en jaune). Les profils en travers disponibles sont matérialisés par des lignes vertes. ....	33
Figure 22 :	Représentation graphique de la Fraction Potentiellement Affectée (FPA ou PAF) (axe des Y) au regard de la concentration en polluant dans le sol (axe des X) (Klepper & van de Meent, 1997). ....	39

## Liste des tableaux

Tableau 1 :	Statistiques descriptives des résultats de concentrations en métaux lourds dans le sol (exprimés en mg/kg MS). .....	10
Tableau 2 :	Valeurs guides oSW1/oPW1 extraites du MERKBLATT Alex02 et propositions de Valeurs de Référence (sol) pour le Grand-Duché du Luxembourg (propositions DECLAM, Février 2015). .....	14
Tableau 3 :	Résultats des mesures en métaux lourds des échantillons de sol (en mg/kg MS) et comparaison aux valeurs guides allemandes oSW1/oPW1. ....	15
Tableau 4 :	Résultats des mesures en métaux lourds des échantillons de sol (en mg/kg MS) et comparaison aux propositions de Valeurs de Référence (VR) luxembourgeoises. ....	16
Tableau 5 :	Résultats des mesures en zinc : concentration totale et fraction échangeable (exprimée en mg de polluant/kg de sol sec). ....	18
Tableau 6 :	Concentrations en métaux lourds dans les Ficaires ( <i>Ranunculus ficaria</i> ) (exprimées en mg de polluant/kg de matière sèche (MS)) collectées en zones témoin et impactée. ....	19
Tableau 7 :	Concentrations en métaux lourds dans les lombrics (mg/kg de matière sèche, MS) collectés en zones témoin et impactée. ....	21
Tableau 8 :	Concentrations représentatives en cadmium, en cuivre et en zinc (exprimées en mg de polluant/kg de sol sec) dans la couche de cendres pour l'étude de risques (santé, eau et écosystèmes) : zone impactée <i>versus</i> zone non-impactée (approches réaliste et conservatoire). ....	29
Tableau 9 :	Répartition du temps d'exposition d'un enfant ou d'un adulte pour un usage récréatif sans bâti. ....	30
Tableau 10 :	Résultats des calculs de doses d'exposition (mg/kg <sub>poids corporel</sub> /jour) et d'indices de risques pour le zinc. ....	31
Tableau 11 :	Résultats des calculs de doses d'exposition (mg/kg <sub>poids corporel</sub> /jour) et d'indices de risques pour le cadmium. ....	31
Tableau 12 :	Résultats des calculs de doses d'exposition (mg/kg <sub>poids corporel</sub> /jour) et d'indices de risques pour le cuivre. ....	31
Tableau 13 :	Concentrations en zinc modélisées dans l'eau souterraine (en µg/L) au droit de la couche de cendres. ....	35
Tableau 14 :	Impact du zinc sur la végétation terrestre, les invertébrés du sol et les microorganismes, exprimé par la Fraction Potentiellement Affectée (en %). ....	39
Tableau 15 :	Impact du cadmium sur la végétation terrestre, les invertébrés du sol et les microorganismes, exprimé par la Fraction Potentiellement Affectée (en %). ....	40
Tableau 16 :	Impact du cuivre sur la végétation terrestre, les invertébrés du sol et les microorganismes, exprimé par la Fraction Potentiellement Affectée (en %). ....	40
Tableau 17 :	Valeurs de Référence Ecotoxicologiques (VRE) (mg/kg <sub>poids corporel animal</sub> /jour), doses totales d'exposition (mg/kg <sub>p.c animal</sub> /jour), et Indices de Risques (IR) (sans unité) calculés pour la zone impactée ( <i>approche conservatoire</i> ) et hors couche de cendres. ....	43
Tableau 18 :	Valeurs de Référence Ecotoxicologiques (VRE) (mg/kg <sub>poids corporel animal</sub> /jour), doses totales d'exposition (mg/kg <sub>p.c animal</sub> /jour), et Indices de Risques (IR) (sans unité) calculés pour la zone impactée ( <i>approche réaliste</i> ) et hors couche de cendres. ....	44
Tableau 19 :	Tableau comparatif des Fractions Potentiellement Affectées (exprimées en %) et Indices de risques (sans unité) en fonction de la concentration totale (représentative de la couche de cendres) et de la fraction échangeable du zinc. ....	45



## Acronymes

APL-Sol	Avant-projet de loi luxembourgeois sur la protection des sols et gestion des sites pollués
eCEC	Capacité d'Echange Cationique effective
ER-E	Evaluation des risques pour les écosystèmes
ER-N	Evaluation des risques pour les eaux souterraines
ER-SH	Evaluation des risques pour la santé humaine
FPA	Fraction Potentiellement Affectée
GRER	Guide de Référence pour l'Etude de Risques (Wallonie, Belgique)
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
IR	Indice de Risque
MB	Matière Brute (matière fraîche)
MCS	Modèle Conceptuel de Site
MS	Matière sèche
oSW1	<i>Orientierungswerte für den Boden orientierende Sanierungszielwerte</i>
oPW1	<i>Orientierungswerte für den Boden orientierende Prüfwerte</i>
VR	Valeur de Référence (selon l'APL-Sol)
VRE	Valeur de Référence Ecotoxicologique
VTR	Valeur Toxicologique de Référence



## Résumé non technique

La présente étude fait suite à la demande de l'Administration de l'Environnement (AEV, Division des Déchets, Service Sites contaminés et anciennes décharges) de poursuivre l'investigation de la pollution du sol générée par la présence de cendres de pneus au pied de la décharge « Est » de la commune de Bissen (site classé Natura 2000). Ce travail s'inscrit dans la continuité des premiers travaux engagés sur le terrain par la société Luxcontrol. Ceux-ci ont révélé la présence de métaux lourds dans le sol, et tout particulièrement de zinc, à hauteur des dépôts de cendres identifiés au pied de la décharge. Le volume des cendres y avait été estimé en première analyse à 1000 m<sup>3</sup>.

Partant de ces premières données, la présente étude a eu pour objectifs :

- d'affiner la première approximation faite sur le volume de cendres et d'effectuer une caractérisation spatiale détaillée des pollutions en métaux lourds ;
- partant de la caractérisation de la distribution spatiale des pollutions, d'effectuer une étude préliminaire des risques afin d'établir les meilleures recommandations en termes de gestion (poursuite de l'évaluation risques ou recommandations directes de gestion).

Pour atteindre ces objectifs, une nouvelle campagne d'investigation du sol a été réalisée en avril 2015. Cette campagne a procédé en la réalisation de 34 points de sondages répartis selon un maillage de ± 2.5 x 2 m. Parmi les 34 points de sondage, 3 points ont été effectués sur la partie inférieure du flanc du talus, les autres (31) ont concerné la plaine des alluvions/colluvions. Au total 65 échantillons de sol ont été prélevés (en moyenne 2 échantillons par point de sondage) et analysés en métaux lourds. Ces analyses de sols ont été complétées par des mesures des teneurs en métaux lourds dans des plantes et des lombrics. Les échantillons (plantes et lombrics) ont été prélevés parallèlement :

- dans la zone impactée par les dépôts de cendres (en plaine) et,
- en zone témoin à proximité de la zone impactée mais exempte de toute trace de cendres.

Les investigations de terrain (descriptions pédologiques) ont montré que la couche de cendres - pour les 23 des 65 points de sondage effectués où sa présence a été confirmée visuellement - est, de manière générale, bien délimitée en profondeur. Elle affleure en surface sur environ 35-40 % de sa superficie, et pour le restant elle est présente à faible profondeur (à ± 40 cm - ns) sous une couche limono-sableuse de colluvions. La part la plus essentielle du volume des cendres est localisée au pied du talus mais le dépôt s'étend aussi dans la partie inférieure du talus ; dans ce dernier cas, les cendres se retrouvent en surface dans des zones protégées du ruissellement (dépressions séparant les zones convexes d'affleurement de la roche).

Les résultats des analyses de sol ont confirmé l'impact de la présence de cendres de pneus sur les concentrations en métaux lourds. Les métaux lourds présents à des concentrations dépassant les valeurs habituelles sont le zinc, le cuivre, le cadmium et, dans une moindre mesure, l'arsenic, le nickel et le chrome. Parmi ces polluants, c'est le zinc - élément connu pour être contenu en quantité relativement importantes dans les déchets de pneus et leurs résidus de combustion - qui présente l'impact le plus marqué : les concentrations moyennes dépassent de plus de 200 fois les valeurs indicatives des concentrations de fond du sol luxembourgeois (Valeurs de Référence).

L'analyse des résultats de l'échantillonnage de terrain a conduit à estimer le volume pollué selon deux approches :

- (1) en s'attachant à la couche de cendres *sensu stricto*, telle que délimitée par les observations visuelles de terrain : selon cette approche, la couche de cendres s'étend jusqu'à 40 cm - ns (à

- l'exception d'un échantillon allant jusque 80 cm(ns), couvre une superficie de 220 m<sup>2</sup> et représente un volume estimé à **133 m<sup>3</sup>**. Cette approche a été qualifiée de « réaliste » ;
- (2) en incluant également dans les calculs, les volumes de sol proches de la couche de cendres dont les concentrations sont significativement différentes des teneurs habituelles en Zn dans le sol (Valeurs de Référence) : selon cette approche la couche polluée s'étend jusqu'à 80 cm - ns sur une superficie estimée à 315 m<sup>2</sup> résultant en un volume (sol + cendres) pollué évalué à **212 m<sup>3</sup>**. Cette seconde approche a été qualifiée de « conservatoire ».

Une étude préliminaire des risques a ensuite été réalisée au départ des analyses de sol en métaux lourds et également des analyses de la végétation terrestre et de lombrics. Ces risques ont été évalués pour la santé humaine, les eaux souterraines et l'écosystème.

En ce qui concerne la santé humaine, tout risque a pu être exclu dans le cadre de l'utilisation récréative du terrain pour un enfant et un adulte l'accompagnant. Ce résultat est pour partie dû au caractère faiblement toxique du zinc pour la santé. Il tient aussi aux caractéristiques du scénario « récréatif » d'exposition pris comme référence dans les calculs (modélisation de l'exposition par recours au modèle C-Soil) : ce scénario considère une fréquentation régulière du terrain par une même cible et non un séjour permanent sur le site.

L'étude des risques envers les eaux souterraines a démontré l'immobilité théorique du zinc sous les conditions de sol (pH principalement) et de climat (infiltration estimée de 300 mm/an) qui prévalent pour le site. Selon les calculs effectués (modélisation du lessivage à l'aide du programme F-LEACH), le temps estimé pour que le zinc atteigne la nappe – en positionnant celle-ci à 0.6 m sous la limite inférieure de la couche de cendre - et y produise un premier relèvement mesurable des concentrations serait de l'ordre de 500 ans. Ce résultat consolide la présomption d'absence de risque et d'effet de lessivage qui pouvait être anticipée d'après les mesures effectuées dans l'eau souterraine à l'aval hydrogéologique de la zone en 2013 (piézomètres installés et échantillonnés dans le cadre de la première étude de sol, cf. rapport Luxcontrol). Des conclusions identiques sont dégagées de l'analyse des risques du transport en zone saturée (cas par exemple des zones où la nappe affleure en surface et la couche de cendre est saturée d'eau) et pour la qualité des eaux de surface (l'Attert) : ces risques sont négligeables.

L'étude de l'impact potentiel de la couche de cendres sur l'écosystème en place a révélé qu'un effet néfaste significatif sur les fonctions vitales des microorganismes, des invertébrés et de la végétation terrestre est théoriquement attendu aux concentrations en cuivre et aux concentrations biodisponibles en zinc mesurées dans la couche de cendres. Pour le zinc, la fraction (FPA) attendue des espèces biologiques susceptibles d'encourir des effets néfastes est comprise entre 80% (pour le groupe taxonomique des microorganismes) et 90% (végétation terrestre). Pour les plantes, ce résultat converge avec les observations de terrains qui ont montré l'absence de végétation (mercuriales et ficaires) en certains endroits où la couche de cendres était présente dès la surface. La flore semble en effet ne pas se développer de manière homogène au pied du talus de la décharge, tout en étant néanmoins diversifiée. L'impact réel de la couche de cendres sur les invertébrés du sol (et plus particulièrement le lombric) pourrait par contre être plus limité sur le terrain que prévu d'après les estimations théoriques (ceci au vu des nombreux individus qui ont été observés pendant la campagne d'échantillonnage, en comparaison avec la zone témoin).

S'agissant en revanche des maillons trophiques supérieurs de l'écosystème (oiseaux et mammifères), l'évaluation des risques réalisée (partant notamment des concentrations en polluant mesurées dans les plantes et invertébrés, ainsi que, pour le zinc, des concentrations biodisponibles) a conclu que les doses d'exposition théoriquement attendues n'excèderaient pas les limites sécuritaires (valeurs

toxicologiques de référence). Les observations de terrain consolident de manière générale ce résultat : de nombreux individus d'oiseaux et de petits mammifères (tels que le campagnol) ont été observés tout au long de la campagne d'échantillonnage.

**En conclusion :** le volume pollué évalué de façon conservatoire<sup>1</sup> serait de l'ordre de 220 m<sup>3</sup> et il occuperait une surface de l'ordre de 320 m<sup>2</sup> (3,2 ares). La pollution peut être considérée comme sans risque pour la santé, pour l'eau de surface et l'eau souterraine. Son seul impact concernerait les organismes biologiques des niveaux trophiques inférieurs (microorganismes, invertébrés et plantes) directement associés aux volumes pollués. Partant du principe qu'il n'y aurait pas d'impact sur les maillons supérieurs de l'échelle trophique, le gain environnemental qu'il y aurait à assainir la zone se limiterait à regagner une surface saine sur le plan biologique. Comme cette surface ne représente que 0,1% de la surface de l'unité « Kallekhaf » de la zone Natura 2000 LU0001014 qui englobe la surface d'étude, le gain environnemental nous paraît pouvoir être considéré comme négligeable. Selon la vision des parties intéressées à l'étude, un assainissement par excavation et retrait des couches polluées pourrait néanmoins être envisagé pour la partie de la surface où les cendres existent en surface (excavation en moyenne jusque 40 cm de profondeur, sur une largeur d'approximativement 5.50 m à partir de la limite du talus de la décharge et sur une longueur d'environ 30 m). L'utilisation d'engins de chantiers étant à proscrire, il s'agirait dans ce cas de procéder de façon manuelle (pelle de terrassier ou autres) avec une attention particulière accordée pour prévenir les impacts sur les biotopes en place.

<sup>1</sup> Il faut néanmoins considérer qu'à flanc de talus des petites poches de cendres peuvent exister très localement et ne pas avoir été repérées lors de l'échantillonnage.



## 1. Contexte et justification de l'étude

La présente étude fait suite à la demande exprimée par l'Administration de l'Environnement (AEV, Division des Déchets, Service Sites contaminés et anciennes décharges) de définir les meilleures stratégies de gestion pour le site de la décharge de Bissen (Grand-Duché du Luxembourg) et plus particulièrement pour le dépôt de cendres retrouvé au pied de la décharge « Est ». Compte tenu d'une part des résultats des études antérieures (cf. §3) rapportant une pollution du terrain en métaux lourds à moins d'un mètre de profondeur sur une surface de l'ordre de 500 m<sup>2</sup> et, d'autre part, de la sensibilité de ce terrain, classé en tant que site Natura 2000<sup>2</sup>, une étude détaillée du dépôt de cendres appuyée par une étude préliminaire des risques associés à la pollution a été entreprise pour fournir les éléments utiles à la définition des stratégies de gestion.

## 2. Objectifs spécifiques et étapes de travail

Pour la réalisation de l'objectif général cité supra, nous avons suivi 3 étapes de travail :

- réalisation d'une nouvelle campagne d'échantillonnage du sol orientée sur la surface du terrain présumée contenir le dépôt de cendres, détermination de la distribution des concentrations en métaux lourds (plus particulièrement en zinc) et de la de la volumétrie de la zone polluée et acquisition des paramètres utiles à la caractérisation préliminaire des risques ;
- caractérisation préliminaire des risques incluant une évaluation des risques pour la santé humaine, les eaux souterraines et les écosystèmes ;
- intégration et interprétation générale de ces résultats avec élaboration des recommandations de gestion.

Plus particulièrement en ce qui concerne l'évaluation des risques pour les écosystèmes, celle-ci ci incluait :

- l'établissement d'un Modèle Conceptuel de Site (MCS) c'est-à-dire la schématisation et l'étude des liens existant entre les sources de pollution, les cibles (organismes vivants) et les voies de transfert entre ces deux éléments sur base des observations de terrain ;
- pour chaque polluant et en tenant compte des concentrations mesurées dans le sol :
  - o l'établissement des Fractions Potentiellement Affectées (FPA) des espèces associées aux différents polluants pris individuellement,
  - o l'établissement, si jugé pertinent, de la valeur de FPA combinant la présence de différents polluants (combi-FPA),
  - o l'interprétation en termes de risques envers les maillons trophiques supérieurs (oiseaux et mammifères).

<sup>2</sup> Référence du site Natura 2000 : LU0001014 – « Zones humides de Bissen et Fensterdall ». La totalité de celui-ci couvre une aire de 44.46 ha.

### 3. Etudes antérieures

Le site de la décharge de Bissen a déjà fait l'objet de deux études :

- un « rapport d'investigations sommaires »<sup>3</sup> a été rédigé en mai 2004 par l'Administration de l'Environnement à la demande de l'Administration des Eaux & Forêts. Il s'agissait dans cette étude préliminaire de déterminer l'envergure de dépôts de déchets au sein d'une zone protégée (selon la directive européenne Habitats<sup>4</sup>) et d'évaluer leur impact éventuel sur le milieu naturel (forêt alluviale résiduelle en place). Dans ce but, 4 échantillons de sol ont été analysés en métaux, Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), indices phénoliques, dioxines et furanes ; un échantillon a été prélevé en zone témoin (en amont du dépôt), deux autres au niveau des cendres issues de l'incendie de pneus et enfin, un dernier échantillon en aval de la zone de stockage et d'incendie de pneus et localisé au pied de la décharge. Les résultats de ces analyses ont démontré la présence de concentrations très importantes en zinc au niveau des dépôts de pneus. Les échantillons prélevés au niveau de la zone alluvionnaire ne présentaient quant à eux pas de contamination (pas de différence entre l'échantillon témoin et l'échantillon prélevé au pied de la décharge). Sur base de cette étude, l'enlèvement de ces dépôts a été souhaité par l'Administration des Eaux et Forêts ;
- une « Etude d'impact relative à la caractérisation des déchets et à la détermination du degré de pollution du sol, du sous-sol et des eaux souterraines dans l'aire de la décharge « Est » située le long de la RN22 à Bissen » a ensuite été réalisée en deux temps (rapports de mars 2013 et d'avril 2013<sup>5</sup>) par la société Luxcontrol. Mandatée par l'Administration de l'Environnement, cette étude avait divers objectifs dont les plus pertinents pour la présente étude ont été repris ci-dessous ainsi que leurs conclusions générales :
  - o délimiter l'étendue des cendres déposées en aval du dépôt et estimation de leur volume, celui-ci a été estimé à environ 1000 m<sup>3</sup> (en considérant 500 m<sup>2</sup> de surface touché sur une profondeur de la pollution d'environ 2 m);
  - o caractériser de manière détaillée ces cendres : des métaux lourds (plus particulièrement du zinc et du cuivre) et, en proportions relativement moindres, des hydrocarbures pétroliers ont été identifiés dans les cendres localisées au pied de la décharge ;
  - o déterminer la contamination éventuelle provenant des cendres sur le sol et les eaux superficielles avoisinantes (Attert) : à l'exception de quelques traces résiduelles en hydrocarbures pétroliers, l'étendue de la contamination des alentours (sol et eau) par le dépôt de cendres reste très limitée ;
  - o déterminer le degré de contamination des couches superficielles de recouvrement du dépôt : quelques contaminations locales et ponctuelles ont été identifiées mais elles n'ont pas fait l'objet d'un assainissement complémentaire étant donné la conformité des analyses moyennes de celles-ci aux critères d'admission des déchets inertes selon la législation.

<sup>3</sup> Administration de l'Environnement, Division des Déchets, Mai 2004, Ancienne décharge à Bissen, Rapport d'investigations sommaires (Dossier P0751).

<sup>4</sup> Directive 92/43/CEE relative à la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et flore sauvage.

<sup>5</sup> Rapports RA 23054144.4 THR et RA 23054144.4 THR.



#### **4. Campagne d'échantillonnage 2015 : sol, plantes et lombrics**

Afin de répondre à la question de la délimitation plus précise du volume de pollution engendrée par le dépôt de cendres sur la décharge « Est » et de son impact éventuel sur l'environnement et la santé humaine, une nouvelle campagne d'échantillonnage a été réalisée les 28 et 29 avril 2015.

Au cours de cette campagne, des échantillons de sol, de plantes et de lombrics ont été prélevés puis analysés en métaux lourds. Une description plus précise de ces échantillonnages est rapportée dans les sous-points suivants.

##### **4.1 Prélèvements et analyses d'échantillons de sol**

40 points de sondage ont été réalisés selon un maillage de  $\pm 2.5 \times 2$  m configuré de façon à englober la surface supposée contenir le dépôt de cendres (surface déduite des observations de l'étude antérieure Luxcontrol et de sondages de reconnaissance). Les figures ci-dessous localisent les points de prélèvements sur un fond cartographique (extrait du portail luxembourgeois à l'échelle 1/750 pour la **Figure 1** et zoom sur la zone échantillonnée à la **Figure 2**).

Les points sondage sont situés pour la majorité dans la plaine alluvionnaire et pour quelques-uns (9 points) dans la partie inférieure du flanc de talus (dont la limite est symbolisée par une ligne en pointillée à la **Figure 2**). Partant du maillage préétabli, la sélection des points de sondage a encore été orientée sur le terrain en fonction des observations faites au fur et à mesure des prélèvements sur la présence des cendres et/ou de la présence visible de pneus (cf. photos 4 et 11 à 13 de l'**Annexe 2**). Le maillage s'est également ajusté pour tenir compte des contraintes liées à la végétation.

Les 40 points de sondage de cette campagne ainsi que 8 points préexistants<sup>6</sup> (campagne Luxcontrol) ont fait l'objet d'un relevé topographique pour leur géoréférencement en coordonnées X, Y et Z nationales<sup>7</sup>. Les données sont fournies en **Annexe 1**. Un reportage photographique est fourni en **Annexe 2**.

Parmi les 40 points de sondage, 35 ont fait l'objet de prélèvements pour analyses. Au total, 65 échantillons de sol ont été analysés. Les échantillons de sol ont été prélevés à la sonde tubulaire dans la mesure du possible ou à la tarière pédologique<sup>8</sup> (lorsque la couche de cendres était friable et dans le cas des zones engorgées d'eau). Par point de sondage, 1 à 4 échantillons ont été prélevés pour analyse.

Les log de forage avec indication des couches de sol prélevées pour la constitution des échantillons sont donnés à l'**Annexe 3**.

<sup>6</sup> Cf. rapport Luxcontrol RA 23054144.4 THR.

<sup>7</sup> Points levés en coordonnées X, Y nationales luxembourgeoises (LUREF) ; le calcul de l'altitude des points a été effectué dans le système de référence national NG95 – SPSLux. Les relevés et calculs ont été effectués par « Best-Topo », bureau de géomètres situé à Senningerberg au Luxembourg.

<sup>8</sup> Les sondages ont été réalisés avec l'aide de Gefotech sprl., société de forage de sol à Walhain, en Belgique.

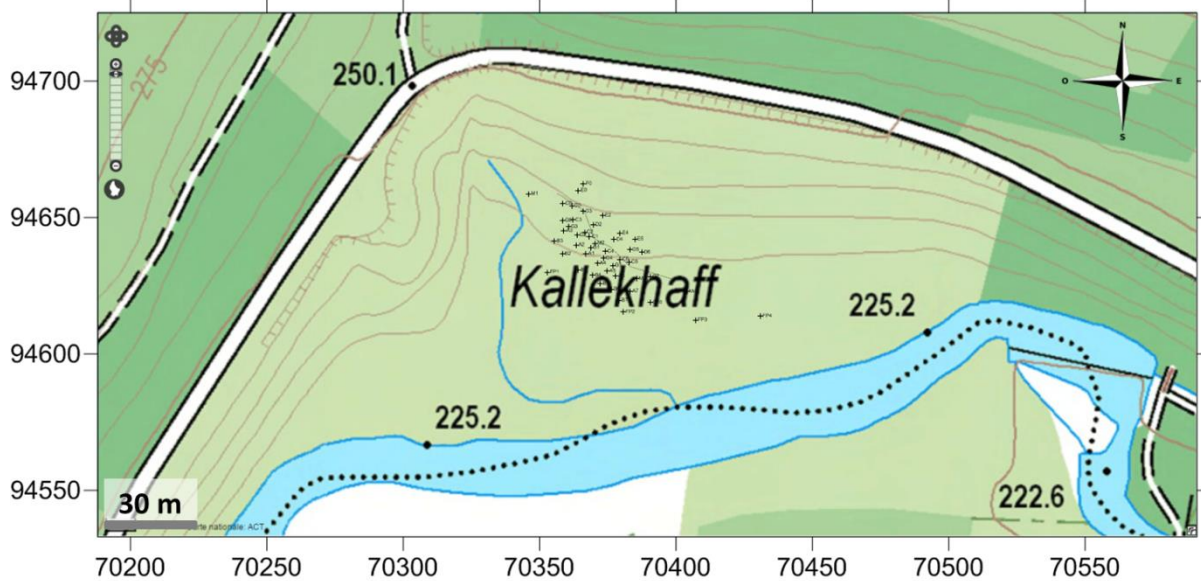


Figure 1 : Zone d'échantillonnage. Extrait de la carte topographique (échelle 1/750) du site de la décharge de Bissen.

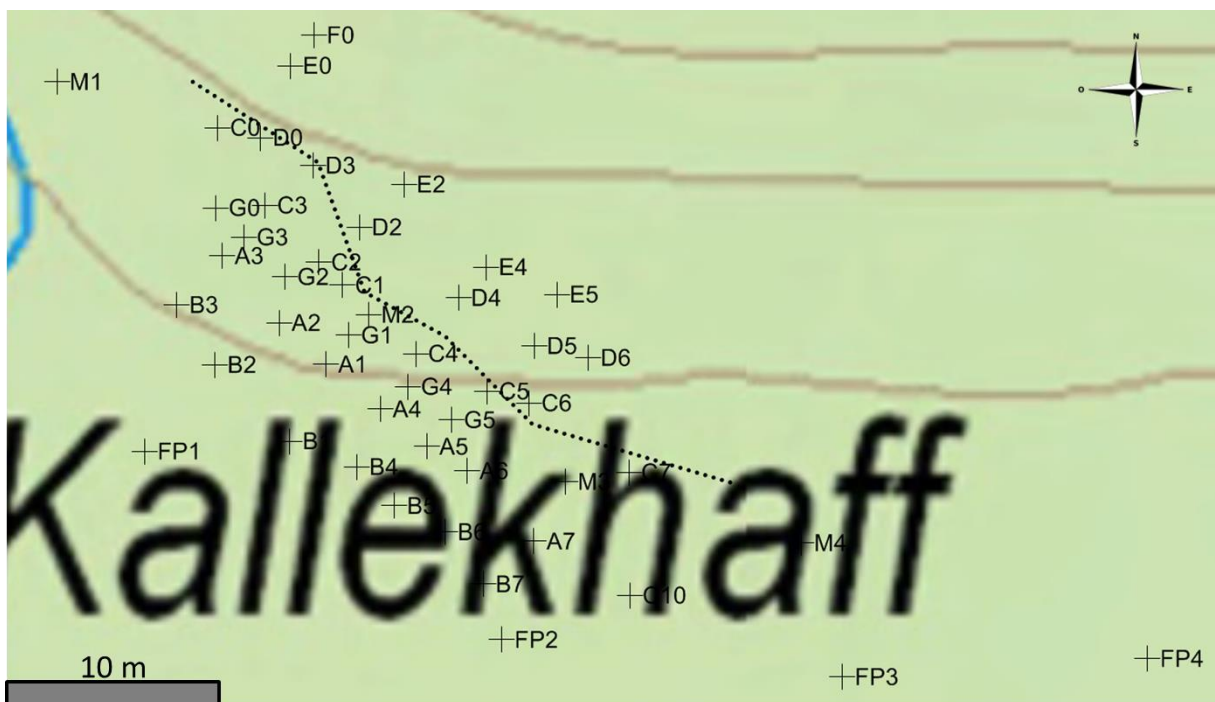


Figure 2 : Zoom sur l'extrait de la Figure 1 rapportant les points de sondage d'avril 2015 (A0 à G5) ainsi que les points (M1 à M4) et piézomètres (FP1 à FP4) placés au cours des précédentes campagnes de sol. La ligne pointillée représente la limite du talus de la décharge.

Les analyses suivantes ont été effectuées<sup>9</sup> sur l'ensemble des 65 échantillons prélevés :

- matière sèche (%);
- matière organique (%);
- granulométrie (% fractions > à 2 mm et < à 2 mm);
- concentrations en métaux lourds<sup>10</sup> : arsenic, cadmium, chrome, cuivre, mercure, plomb, nickel et zinc (concentrations totales mesurées à l'eau régale).

Le pH et la fraction argileuse (% MS) ont été déterminés sur 8 échantillons estimés comme représentatifs de l'ensemble

Le choix de ces analyses a été concerté avec le commanditaire de l'étude (Administration de l'Environnement). Il tient compte de la composition typique des pneus<sup>11</sup> ainsi que des résultats de l'étude de Luxcontrol<sup>12</sup>.

Dans la perspective de l'évaluation des risques pour l'écosystème, les analyses des concentrations totales zinc ont été complétées par des analyses des « concentrations biodisponibles », plus directement déterminante du potentiel écotoxique.

La mesure a été effectuée par la méthode de l'échange isotopique<sup>13</sup>. Elle a été réalisée sur la fraction du sol inférieure à 2 mm, séparée par tamisage au départ d'un échantillon prélevé en surface (0 – 15 cm) à hauteur du début du talus (échantillon E.0). Cet échantillon contenait des restes de ferrailles de pneus (de tailles supérieures à 2mm) mélangées à des cendres dans une proportion d'environ 50 %-50 % (cf. photos 14 et 15 de l'**Annexe 2**). Pour disposer d'une idée de la réserve en Zn contenue dans les ferrailles, l'échantillon a été tamisé à 2 mm et les teneurs totales en Zn des fractions inférieures et supérieures à 2 mm analysées séparément.

#### **4.2 Prélèvements et analyses d'échantillons de plantes**

Dans le but d'évaluer l'impact du dépôt de cendres sur la flore (et indirectement la faune) des alentours, un échantillon de plantes (Ficaire fausse-renoncule ou *Ranunculus ficaria*) d'approximativement 300 g a été prélevé respectivement en zone « impactée » et en zone témoin située hors influence de la couche de cendres.

Le choix de la ficaire fausse-renoncule se justifie par sa présence sur le terrain à la fois en dehors de la zone d'influence de la couche de cendres mais également au pied du talus (à la limite inférieure du début des cendres identifiées sur place au cours de l'échantillonnage de sol) et donc sous influence de la couche de cendres. Les photos 16 et 17 de l'**Annexe 2** montrent le prélèvement réalisé à hauteur de la zone impactée (traces de cendres visibles).

<sup>9</sup> Ces analyses ont été réalisées par ALcontrol laboratories dont le siège se trouve aux Pays-Bas.

<sup>10</sup> L'analyse des métaux lourds se réalise sur la fraction de l'échantillon qui après avoir été concassé (mais non broyé) passe sous un tamis de 2 millimètres.

<sup>11</sup> La composition typique des pneus est présentée et discutée dans le rapport Luxcontrol Pour rappel, ceux-ci sont composés majoritairement de caoutchouc synthétique, d'additifs tels que les oxydes de fer et de zinc mais également de fils d'acier présentent des teneurs élevées en métaux lourds (zinc, chrome, nickel, cadmium, plomb et cuivre).

<sup>12</sup> Les résultats du rapport Luxcontrol justifient notamment le retrait de l'ensemble des composés organiques du champ des investigations : même si des composés de type PCB, dioxines et huiles minérales ont pu être retrouvés, leur présence s'est avérée très ponctuelle et avec des niveaux de concentrations très faibles relativement aux standards d'interprétation applicables.

<sup>13</sup> Réalisées au sein de la division du sol et de l'eau de la KUL (équipe du Professeur E. Smolders).

Les parties racinaires et aériennes de ces plantes ont fait l'objet des analyses suivantes<sup>14</sup> :

- matière sèche (%);
- métaux lourds : arsenic, cadmium, cuivre et zinc<sup>15</sup>.

Ces analyses ont été réalisées en passant par une étape de séchage à 60°C, broyage puis minéralisation à reflux à l'eau régale (méthode interne au laboratoire).

### **4.3 Collecte et analyses de lombrics**

Afin d'évaluer l'impact du dépôt de cendres sur les microorganismes, un échantillon de lombrics constitué d'une quinzaine d'individus a été prélevé pour chacune des zones étudiées (zone impactée et zone témoin).

Ces lombrics ont fait l'objet des analyses suivantes<sup>16</sup> (exécutée également après réception des analyses de sol) :

- matière sèche (%);
- métaux lourds : arsenic, cadmium, cuivre et zinc.

## **5. Résultats analytiques : concentrations en métaux lourds dans le sol, les plantes et les lombrics**

### **5.1 Echantillons de sol**

L'ensemble des résultats analytiques des 65 échantillons de sol est fourni à l'**Annexe 4**.

#### **5.1.1 Statistiques descriptives**

Un résumé des statistiques descriptives des résultats de concentrations en métaux lourds dans le sol est présenté au **Tableau 1** pour chaque métal analysé.

**Tableau 1 : Statistiques descriptives des résultats de concentrations en métaux lourds dans le sol (exprimés en mg/kg MS).**

	<b>Arsenic</b>	<b>Cadmium</b>	<b>Chrome</b>	<b>Cuivre</b>	<b>Mercure</b>	<b>Nickel</b>	<b>Plomb</b>	<b>Zinc</b>
<b>Minimum</b>	4.0*	0.2*	14.0	5.9	0.05*	13.0	10.0*	46.0
<b>Médiane</b>	5.6	0.2	24.0	14.0	0.05	22.0	14.0	350.0
<b>Percentile 90</b>	29.2	1.2	52.2	668.0	0.08	53.8	38.2	15200.0
<b>Maximum</b>	170.0	5.0	170.0	2500.0	0.12	200.0	160.0	56000.0
<b>Moyenne</b>	15.5	0.5	31.8	190.0	0.06	30.7	22.1	4546.9
<b>Moyenne géométrique</b>	8.3	0.3	27.2	31.9	0.06	25.7	17.8	661.9
<b>Ecart-type</b>	27.0	0.8	25.1	439.4	0.01	27.3	21.5	9338.3

\* LQ : cette valeur est égale à la limite de quantification.

#### **5.1.2 Cas particulier des concentrations en zinc**

Les **Figure 3** et **Figure 4** présentent la distribution des concentrations en zinc dans le sol. Les points suivants ressortent de l'analyse de ces histogrammes :

- un échantillon se détache plus particulièrement de la distribution avec une concentration en zinc de à 56 000 mg/kg (échantillon C1.1 prélevé en surface entre 0 et 20 cm). Le descriptif visuel fait au cours de l'échantillonnage ne mentionnait pas la présence de cendres à cet

<sup>14</sup> Ces analyses ont été réalisées par le laboratoire universitaire « AgroBioTech » de Gembloux, faisant partie de l'Université de Liège en Belgique.

<sup>15</sup> Le choix d'analyses plus restreintes en métaux lourds pour la végétation et les vers de terre a été amorcé après réception des résultats des analyses de sol.

<sup>16</sup> Analyses réalisées par le même laboratoire que précité pour la végétation et par la même méthode interne.

endroit ni de débris de ferrailles ; cependant, la mise en évidence de concentrations élevées en zinc à proximité du point C.1<sup>17</sup> nous permet de conforter l'hypothèse de la présence de cendres dans l'échantillon C1.1 et de l'associer à la problématique étudiée ;

- plus de 50 % des échantillons (36 sur 65) présentent des concentrations inférieures à 500 mg/kg ;
- ponctuellement, certains échantillons présentent des concentrations allant de 660 mg/kg à 27 000 mg/kg.

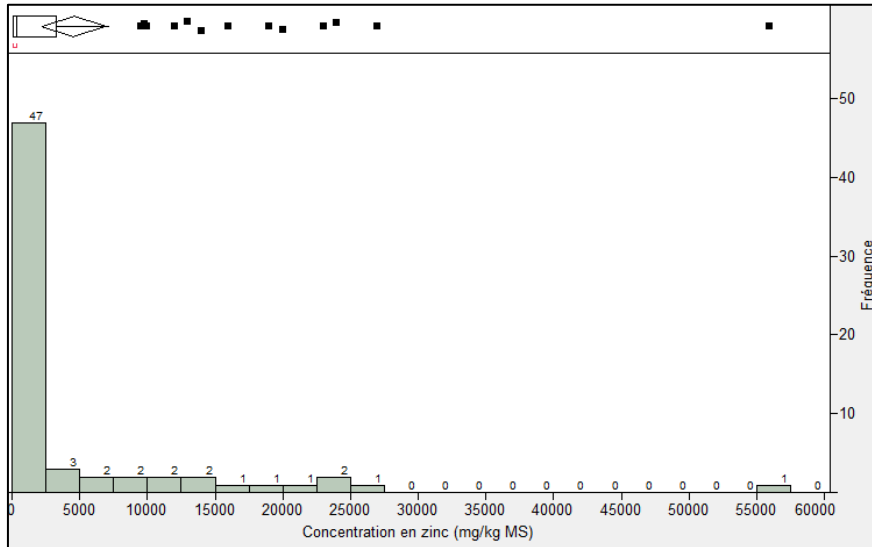


Figure 3 : Histogramme de répartition des concentrations en zinc dans le sol.

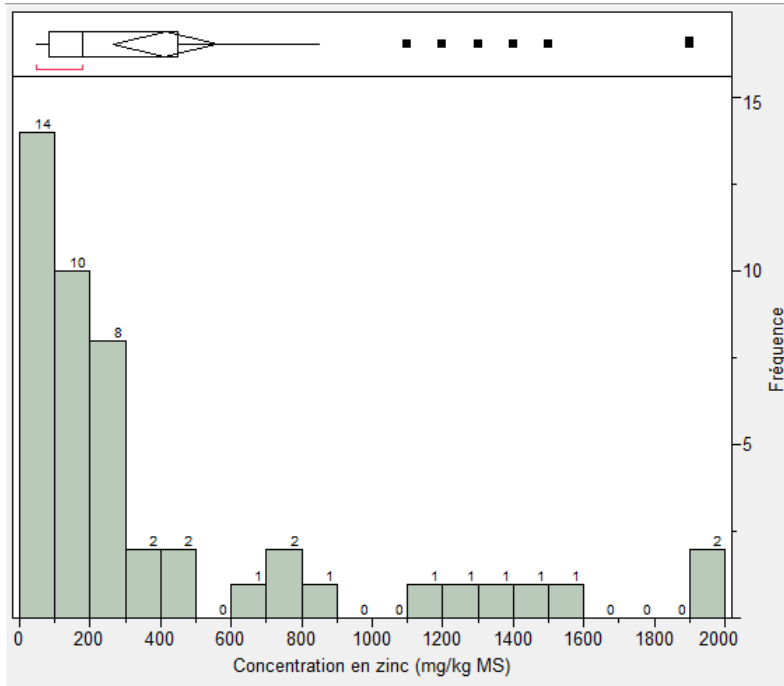


Figure 4 : Histogramme de répartition des concentrations en zinc dans le sol : échantillons présentant une concentration inférieure à 2500 mg/kg (47 échantillons sur 65).

<sup>17</sup> 21 083 mg Zn/kg sol MS dans un échantillon prélevé à hauteur du point M.2 entre 10 et 35 cm de profondeur (étude Luxcontrol RA 23054144.4 THR) ; 16 000 mg Zn/kg sol MS au point de prélèvement C.2 entre la surface et 35 cm de profondeur avec observation de cendres à cet endroit (cf. photos 7 et 8 de l'Annexe 2).

5.1.3 Représentation spatiale des concentrations en métaux : visions 2D et 3D

Les cartes suivantes (Figure 5, Figure 6 et Figure 7) représentent la distribution spatiale des concentrations respectivement en zinc, cuivre et cadmium (symbolisées par les cercles pleins dont la taille est directement proportionnelle aux concentrations) et les courbes d'iso-concentrations obtenues par interpolation des concentrations.

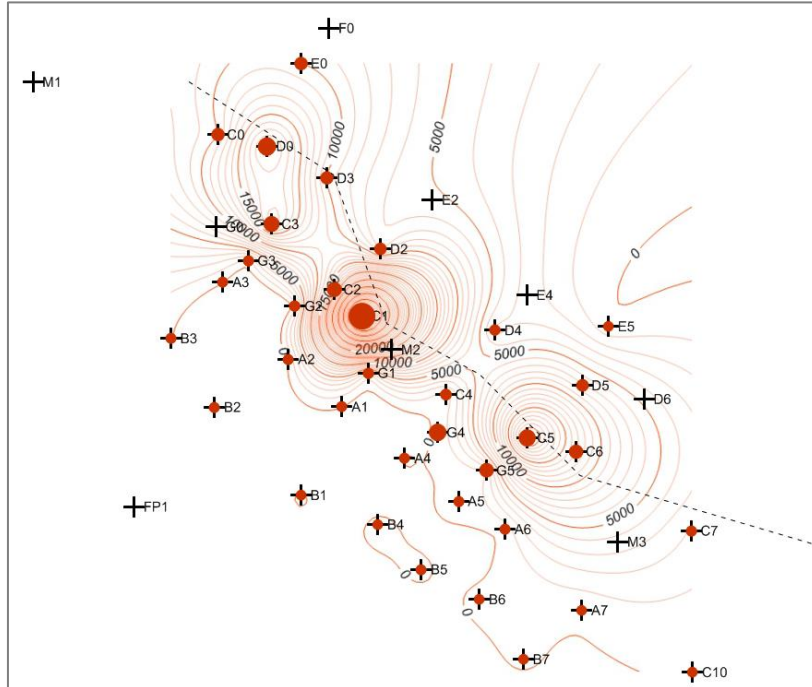


Figure 5 : Carte des iso-concentrations en zinc.

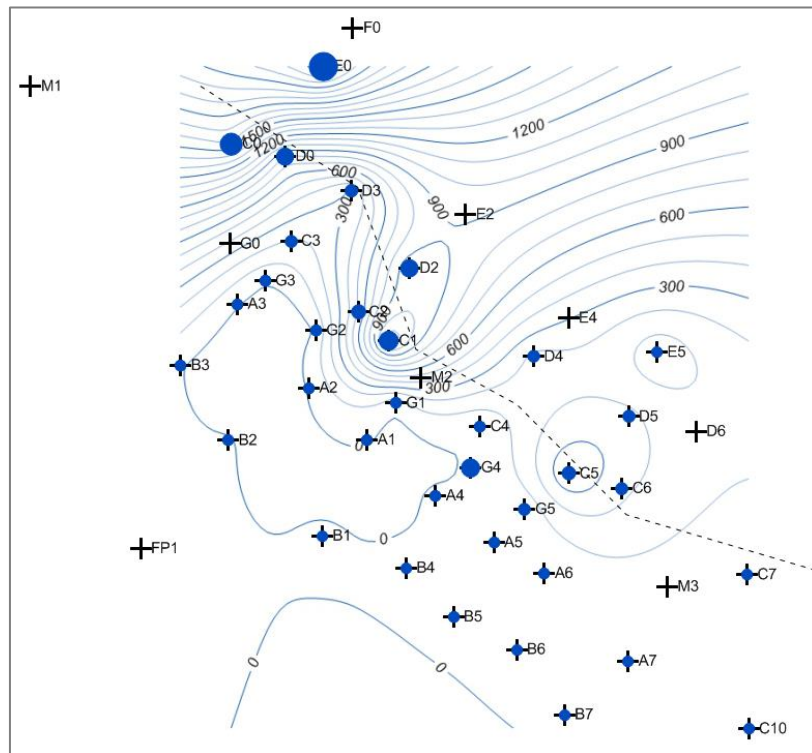


Figure 6 : Carte des iso-concentrations en cuivre.

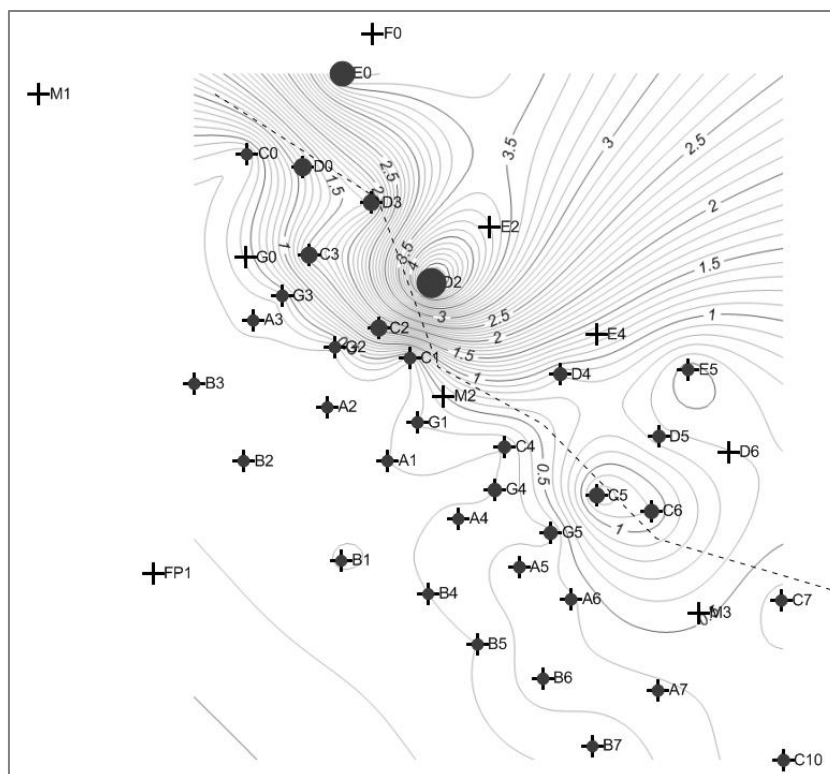


Figure 7 : Carte des iso-concentrations en cadmium.

Une représentation 3D de ces concentrations est également jointe à ce rapport en **Annexe 5** (+ annexe électronique).

L'examen rapide de ces représentations cartographiques permet de mettre en évidence une zone longeant l'axe de la limite de la talus de la décharge (représentée en pointillés sur les figures ci-dessus) où les concentrations (en zinc plus particulièrement) sont les plus importantes.

En termes de profondeur, les concentrations les plus importantes se situent globalement dès la surface.

#### 5.1.4 Comparaison des concentrations mesurées aux valeurs ALEX 02 et teneurs habituelles dans les sols luxembourgeois

A titre informatif, les résultats de concentrations en métaux lourds ont été comparés :

- aux valeurs guides oSW1 et oPW1 (niveau 1) du MERKBLATT Alex 02 ;
- aux propositions de Valeurs de Référence pour le sol (VR) récemment établies<sup>18</sup> dans le cadre de l'avant-projet de loi luxembourgeois sur la protection des sols et gestion des sites pollués. Les VR traduisent les teneurs habituelles normales dans les sols luxembourgeois (soit les concentrations attendues en absence de pollution locale ou de géologie particulière).

Le **Tableau 2** présente les valeurs-guides oSW1/oPW1 et VR luxembourgeoises pour les métaux lourds analysés.

<sup>18</sup> Hissler C., Vegter J. et Giustarini L. (Février 2015) Projet DECLAM, Rapport d'avancement du Groupe de Travail n°1 (GT1), Résultats préliminaires en vue de l'établissement de « Valeurs de référence sols – Définition du sol standard ».

**Tableau 2 : Valeurs guides oSW1/oPW1 extraites du MERKBLATT Alex02 et propositions de Valeurs de Référence (sol) pour le Grand-Duché du Luxembourg (propositions DECLAM, Février 2015).**

Polluant	oSW1 [mg/kg sol]	oPW1 [mg/kg sol]	Valeurs de Référence luxembourgeoises	
			Valeur [mg/kg sol]	Indice de comparaison aux oSW1/oPW1
Arsenic	20	40	82	+
Cadmium	1	2	0.4	-
Chrome	50	100	84	=
Cuivre	50	100	27	-
Mercure	0.5	2	0.12	-
Nickel	40	100	50	=
Plomb	100	200	60	-
Zinc	150	300	211	=

Indice de comparaison : « + » = VR supérieure aux oSW1/oPW1 ; « - » = VR inférieure aux oSW1/oPW1 ; « = » = VR supérieure à oSW1 mais inférieure à oPW1.

La comparaison des concentrations mesurées aux valeurs guides oSW1/oPW1 est effectuée au **Tableau 3**. Globalement, si l'on analyse les dépassements de la valeur-guide d'intervention (oPW1), ces dépassements concernent :

- pour le **zinc** : 51 % des échantillons ;
- pour le **cuivre** : 26 % des échantillons ;
- pour l'arsenic : 9% ;
- pour le cadmium et le chrome : 3%
- pour le nickel : 1% ;
- pour le mercure : pas de dépassements (plus de la moitié des échantillons présentent des concentrations inférieures à la limite de quantification).

Pour ce qui est de la comparaison des concentrations aux VR (Tableau 4), les résultats ont été catégorisés en fonction de leur degré de dépassement des VR soit respectivement :

- inférieurs à la VR (**vert clair**) ;
- entre la VR et un dépassement de 10 % de celle-ci (**vert foncé**) ;
- entre un dépassement de 10 et de 30 % de la VR (**bleu clair**) ;
- entre un dépassement de 30 et 50 % de la VR (**bleu foncé**) ;
- supérieurs à un dépassement de 50 % de la VR (**orange**).

Les résultats de ces comparaisons sont également représentés sous forme de diagrammes par secteurs (cf. **Figure 8**) pour l'arsenic, le cadmium, le cuivre et le zinc, polluants les plus intéressants en termes de résultats.

Il ressort globalement de ces représentations l'impact marqué de la présence de cendres de pneus qui se traduit:

- le plus particulièrement sur le **zinc** (plus de la moitié des échantillons en catégorie « orange ») ;
- puis sur le **cuivre** (un tiers des échantillons en catégorie orange) ;
- ensuite sur le **cadmium** (21 % des échantillons en catégorie orange).

En revanche, en ce qui concerne le nickel, l'arsenic, le chrome et le plomb, et le mercure les échantillons sont majoritairement répartis dans la catégorie « vert clair » (concentrations inférieures à la VR) signifiant qu'on ne peut parler de pollution significative par ces éléments



**Tableau 3: Résultats des mesures en métaux lourds des échantillons de sol (en mg/kg MS) et comparaison aux valeurs guides allemandes oSW1/oPW1.**

Echantillon	Profondeur minimale (cm-ss)	Profondeur maximale (cm-ss)	Profondeur moyenne (cm-ss)	Concentrations en métaux dans le sol (exprimées en mg polluant/kg de sol sec)							
				Arsenic	Cadmium	Chrome	Cuivre	Mercure	Nickel	Plomb	Zinc
E0.1	0	15	8	170	3.8	170	2500	0.05	200	39	10000
D0.1	0	40	20	30	1.1	61	780	0.05	55	37	20000
D0.2	40	80	60	9.3	0.29	27	110	0.05	23	12	2700
D0.3	0	22	11	52	1.9	93	940	0.05	78	60	27000
D0.4	22	35	29	14	0.2	33	240	0.05	30	23	12000
D0.5	35	60	48	6.1	0.2	25	71	0.05	21	12	1900
C0.1	0	15	8	21	0.2	22	1600	0.08	28	68	9800
C0.2	15	60	38	5.7	0.2	25	16	0.05	22	12	260
A3.1	0	20	10	4	0.25	18	7.6	0.05	17	12	83
A3.2	20	100	60	4.5	0.2	24	9.9	0.05	22	10	78
B3.1	0	20	10	4	0.2	16	7	0.05	15	10	46
B3.2	20	100	60	5.4	0.24	20	8.8	0.05	20	12	79
G3.1	0	18	9	4.6	0.34	20	11	0.05	18	17	390
G3.2	18	36	27	4.9	0.28	22	9.7	0.05	20	16	270
G3.3	36	52	44	4.1	0.2	22	8	0.05	19	11	100
C3.1	0	18	9	63	1.6	53	190	0.07	55	160	19000
C3.2	18	40	29	4.1	0.2	21	9	0.05	19	14	450
C3.3	40	60	50	4	0.2	16	5.9	0.05	16	10	250
D3.1	0	40	20	28	1.6	35	290	0.06	38	43	9500
D2.1	0	22	11	110	5	56	980	0.05	92	34	6600
C2.1	0	35	18	25	1.6	46	500	0.12	52	40	16000
C2.2	35	80	58	9.2	0.2	23	30	0.05	21	18	1200
G2.1	0	18	9	4	0.22	22	12	0.05	21	13	200
G2.2	18	36	27	5.4	0.2	20	24	0.07	20	18	1300
G2.3	36	72	54	4	0.2	18	7.1	0.05	15	10	150
A2.1	0	20	10	4	0.2	14	6.5	0.05	13	10	54
A2.2	20	100	60	4	0.2	16	7	0.05	15	11	75
B2.1	0	20	10	4	0.2	15	6.7	0.05	14	10	61
B2.2	20	100	60	5.3	0.24	23	9.5	0.05	21	12	66
A1.1	0	20	10	4	0.2	18	8.3	0.05	17	11	68
A1.2	20	40	30	4.1	0.2	17	6.4	0.05	14	11	51
G1.1	0	30	15	4	0.31	22	23	0.05	20	16	1500
G1.2	30	60	45	5	0.26	18	12	0.08	17	12	780
B1.1	0	20	10	4	0.21	20	9.2	0.05	19	12	69
C1.1	0	20	10	59	0.2	110	1200	0.05	76	55	56000
C1.2	20	80	50	6.8	0.36	19	19	0.05	18	14	1400
D4.1	0	15	8	20	0.81	30	170	0.06	27	31	2700
C4.1	0	20	10	4	0.2	22	12	0.05	21	12	350
C4.2	20	35	28	7.6	0.61	26	30	0.06	26	19	3800
C4.3	35	60	48	7.9	0.2	23	11	0.05	21	11	760
G4.1	0	20	10	4	0.2	18	8.8	0.05	18	11	220
G4.2	25	40	32.5	68	0.87	89	1100	0.09	88	36	24000
G4.3	40	80	60	6.7	0.25	27	40	0.05	22	13	850
A4.1	0	40	20	4	0.22	19	9.2	0.05	19	11	100
A4.2	40	80	60	4.7	0.2	22	17	0.05	19	14	290
B4.1	20	40	30	4	0.2	21	9.4	0.05	18	14	90
B5.1	0	40	20	4	0.2	22	10	0.06	21	14	76
B5.2	40	80	60	6.5	0.2	23	8.9	0.05	23	10	120
A5.1	0	40	20	5.9	0.4	26	13	0.05	24	19	430
A5.2	40	80	60	6.2	0.21	26	10	0.05	23	12	150
G5.1	0	26	13	4	0.26	26	18	0.06	24	16	1100
G5.2	26	36	31	22	0.85	43	190	0.06	45	34	14000
G5.3	36	72	54	6.9	0.21	25	13	0.05	22	12	660
C5.1	0	35	18	18	1.3	44	410	0.11	38	27	23000
C5.2	35	60	48	8.2	0.2	27	12	0.05	26	12	290
D5.1	0	15	8	19	0.64	26	230	0.05	27	26	7100
E5.1	0	20	10	17	0.42	25	29	0.05	25	25	180
C6.1	0	20	10	19	1.1	51	220	0.11	43	36	13000
A6.1	0	40	20	5.6	0.38	24	11	0.05	22	16	280
A6.2	40	80	60	7.5	0.2	29	11	0.05	27	13	92
B6.1	0	40	20	5.3	0.38	28	14	0.08	29	21	110
B7.1	0	40	20	5.6	0.22	35	15	0.07	30	22	110
A7.1	20	40	30	4.3	0.38	33	15	0.06	28	22	170
C7.1	0	20	10	4.7	0.35	21	22	0.06	22	17	1900
C10.1	0	40	20	8.5	0.51	37	17	0.08	35	25	140

**Légende :**

Vert Concentration < oSW1

Orange oSW1 < Concentration < oPW1

Rouge Concentration ≥ oPW1

Valeur égale à la limite de quantification

Profondeurs exprimées en centimètres

**Tableau 4 : Résultats des mesures en métaux lourds des échantillons de sol (en mg/kg MS) et comparaison aux propositions de Valeurs de Référence (VR) luxembourgeoises.**

Echantillon	Profondeur minimale (cm-ss)	Profondeur maximale (cm-ss)	Profondeur moyenne (cm-ss)	Concentrations en métaux dans le sol (exprimées en mg polluant/kg de sol sec)							
				Arsenic	Cadmium	Chrome	Cuivre	Mercure	Nickel	Plomb	Zinc
E0.1	0	15	8	170	3.8	170	2500	0.05	200	39	10000
D0.1	0	40	20	30	1.1	61	780	0.05	55	37	20000
D0.2	40	80	60	9.3	0.29	27	110	0.05	23	12	2700
D0.3	0	22	11	52	1.9	93	940	0.05	78	60	27000
D0.4	22	35	29	14	0.2	33	240	0.05	30	23	12000
D0.5	35	60	48	6.1	0.2	25	71	0.05	21	12	1900
C0.1	0	15	8	21	0.2	22	1600	0.08	28	68	9800
C0.2	15	60	38	5.7	0.2	25	16	0.05	22	12	260
A3.1	0	20	10	4	0.25	18	7.6	0.05	17	12	83
A3.2	20	100	60	4.5	0.2	24	9.9	0.05	22	10	78
B3.1	0	20	10	4	0.2	16	7	0.05	15	10	46
B3.2	20	100	60	5.4	0.24	20	8.8	0.05	20	12	79
G3.1	0	18	9	4.6	0.34	20	11	0.05	18	17	390
G3.2	18	36	27	4.9	0.28	22	9.7	0.05	20	16	270
G3.3	36	52	44	4.1	0.2	22	8	0.05	19	11	100
C3.1	0	18	9	63	1.6	53	190	0.07	55	160	19000
C3.2	18	40	29	4.1	0.2	21	9	0.05	19	14	450
C3.3	40	60	50	4	0.2	16	5.9	0.05	16	10	250
D3.1	0	40	20	28	1.6	35	290	0.06	38	43	9500
D2.1	0	22	11	110	5	56	980	0.05	92	34	6600
C2.1	0	35	18	25	1.6	46	500	0.12	52	40	16000
C2.2	35	80	58	9.2	0.2	23	30	0.05	21	18	1200
G2.1	0	18	9	4	0.22	22	12	0.05	21	13	200
G2.2	18	36	27	5.4	0.2	20	24	0.07	20	18	1300
G2.3	36	72	54	4	0.2	18	7.1	0.05	15	10	150
A2.1	0	20	10	4	0.2	14	6.5	0.05	13	10	54
A2.2	20	100	60	4	0.2	16	7	0.05	15	11	75
B2.1	0	20	10	4	0.2	15	6.7	0.05	14	10	61
B2.2	20	100	60	5.3	0.24	23	9.5	0.05	21	12	66
A1.1	0	20	10	4	0.2	18	8.3	0.05	17	11	68
A1.2	20	40	30	4.1	0.2	17	6.4	0.05	14	11	51
G1.1	0	30	15	4	0.31	22	23	0.05	20	16	1500
G1.2	30	60	45	5	0.26	18	12	0.08	17	12	780
B1.1	0	20	10	4	0.21	20	9.2	0.05	19	12	69
C1.1	0	20	10	59	0.2	110	1200	0.05	76	55	56000
C1.2	20	80	50	6.8	0.36	19	19	0.05	18	14	1400
D4.1	0	15	8	20	0.81	30	170	0.06	27	31	2700
C4.1	0	20	10	4	0.2	22	12	0.05	21	12	350
C4.2	20	35	28	7.6	0.61	26	30	0.06	26	19	3800
C4.3	35	60	48	7.9	0.2	23	11	0.05	21	11	760
G4.1	0	20	10	4	0.2	18	8.8	0.05	18	11	220
G4.2	25	40	33	68	0.87	89	1100	0.09	88	36	24000
G4.3	40	80	60	6.7	0.25	27	40	0.05	22	13	850
A4.1	0	40	20	4	0.22	19	9.2	0.05	19	11	100
A4.2	40	80	60	4.7	0.2	22	17	0.05	19	14	290
B4.1	20	40	30	4	0.2	21	9.4	0.05	18	14	90
B5.1	0	40	20	4	0.2	22	10	0.06	21	14	76
B5.2	40	80	60	6.5	0.2	23	8.9	0.05	23	10	120
A5.1	0	40	20	5.9	0.4	26	13	0.05	24	19	430
A5.2	40	80	60	6.2	0.21	26	10	0.05	23	12	150
G5.1	0	26	13	4	0.26	26	18	0.06	24	16	1100
G5.2	26	36	31	22	0.85	43	190	0.06	45	34	14000
G5.3	36	72	54	6.9	0.21	25	13	0.05	22	12	660
C5.1	0	35	18	18	1.3	44	410	0.11	38	27	23000
C5.2	35	60	48	8.2	0.2	27	12	0.05	26	12	290
D5.1	0	15	8	19	0.64	26	230	0.05	27	26	7100
E5.1	0	20	10	17	0.42	25	29	0.05	25	25	180
C6.1	0	20	10	19	1.1	51	220	0.11	43	36	13000
A6.1	0	40	20	5.6	0.38	24	11	0.05	22	16	280
A6.2	40	80	60	7.5	0.2	29	11	0.05	27	13	92
B6.1	0	40	20	5.3	0.38	28	14	0.08	29	21	110
B7.1	0	40	20	5.6	0.22	35	15	0.07	30	22	110
A7.1	20	40	30	4.3	0.38	33	15	0.06	28	22	170
C7.1	0	20	10	4.7	0.35	21	22	0.06	22	17	1900
C10.1	0	40	20	8.5	0.51	37	17	0.08	35	25	140

**Légende :**

- Vert clair Concentration <VR
- Vert foncé VR < Concentration < 110% VR
- Bleu clair 110% < Concentration < 130% VR
- Bleu foncé 130% VR < Concentration < 150% VR
- Orange Concentration >150% VR

Valeur égale à la limite de quantification

Profondeurs exprimées en centimètres

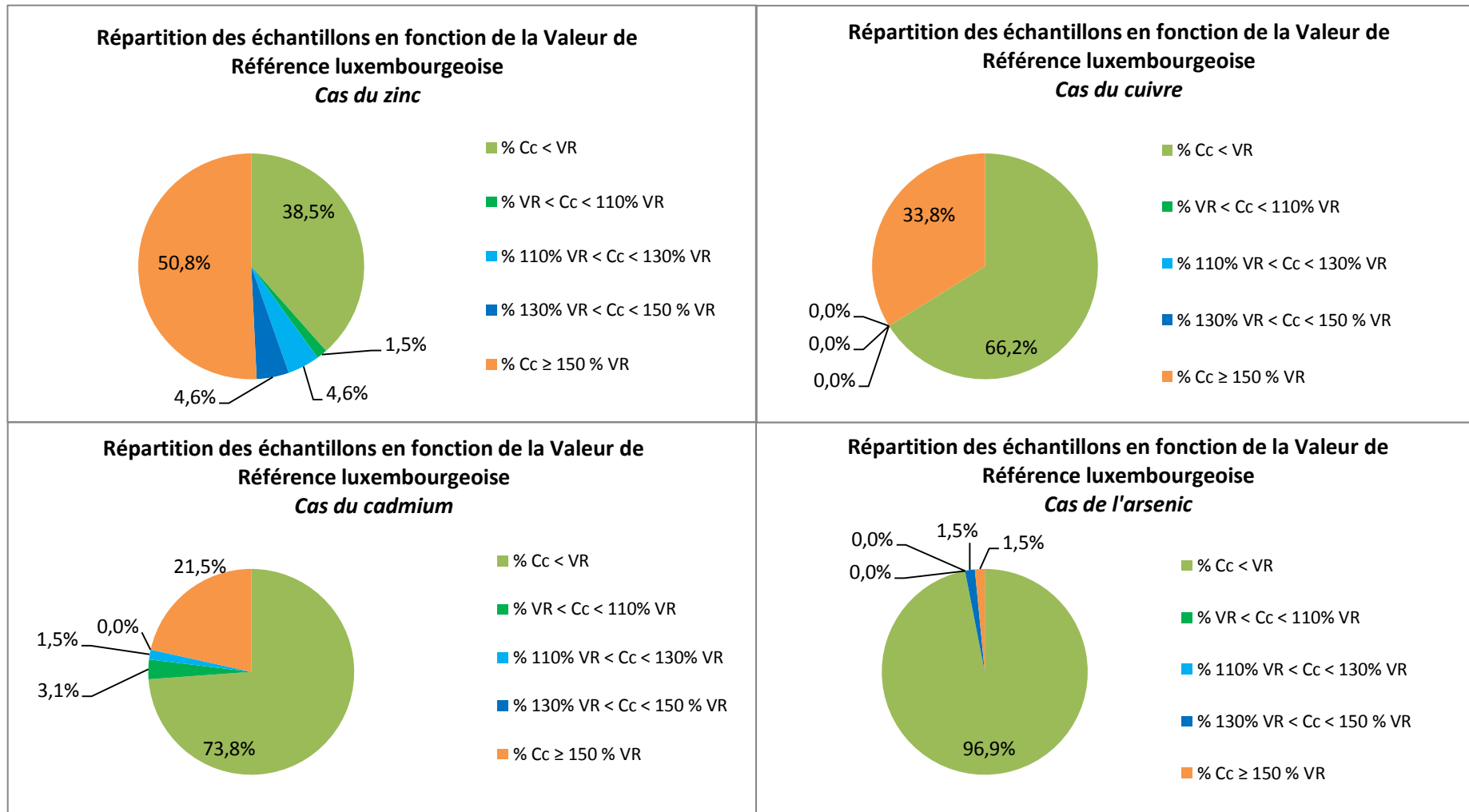


Figure 8: Diagrammes de répartition des concentrations en fonction des propositions de Valeurs de Référence (VR) luxembourgeoises.

### 5.1.5 Résultats de la mesure de la fraction échangeable et de la concentration totale en zinc (KUL)

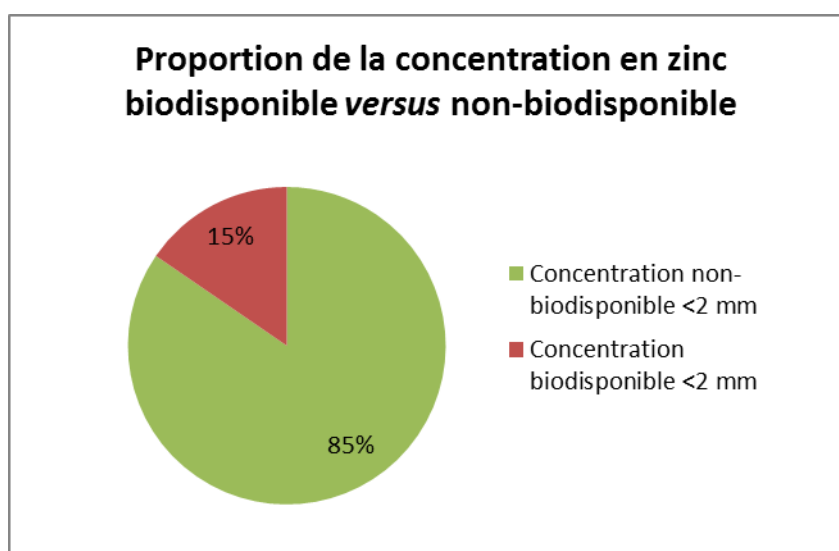
Les résultats obtenus à partir de l'échantillon E.0.1 prélevé entre 0 et 15 cm au début du talus de la décharge sont présentés au **Tableau 5**.

**Tableau 5 : Résultats des mesures en zinc : concentration totale et fraction échangeable (exprimée en mg de polluant/kg de sol sec).**

	Concentration totale en zinc (mg/kg) KUL	Concentration en zinc biodisponible* (mg/kg) KUL
Fraction < 2 mm (réplicat A)	18 800	2980
Fraction < 2 mm (réplicat B)	18 800	2820
Fraction > 2 mm (réplicat A)	470 000	-
Fraction > 2 mm (réplicat B)	650 000	-

\* La fraction échangeable a été mesurée sur la fraction du sol inférieure à 2 millimètres ; la fraction supérieure à 2 mm est constituée de débris de ferrailles d'acier galvanisé (débris des armatures de pneus) sur lesquels la fraction biodisponible n'a pas pu être mesurée

D'après ces résultats, seulement 15% des concentrations totales mesurées seraient présentes sous des formes biodisponibles (**Figure 9**). En réalité, on peut considérer que cette proportion est vraisemblablement plus faible encore si on considère que la série des résultats des tableaux 3 et 4 se réfère à des échantillons concassés en laboratoire après tamisage et qui ont pu intégrer (pour ceux qui concernent les couches de cendres) une partie plus ou moins grande des ferrailles (débris des armatures des pneus en cours d'oxydation) où le Zn peut être considéré a priori comme globalement non biodisponible. (D'après la mesure effectuée sur la concentration totale en Zn de la fraction > 2 mm et en partant d'une approximation d'un rapport pondéral 50%-50% pour les fractions inférieure et supérieure à 2 mm dans l'échantillon brut analysé, la fraction biodisponible serait plutôt de 10%).



**Figure 9 : Concentration en zinc : fractions biodisponible et non-biodisponible (extrait des fractions de l'échantillon inférieures à 2 mm).**

## 5.2 Echantillons de plantes

Les résultats des mesures en métaux lourds effectuées sur les échantillons de plantes prélevées en zone impactée et en zone témoin sont rapportés au **Tableau 6** ci-dessous.

**Tableau 6: Concentrations en métaux lourds dans les Ficares (*Ranunculus ficaria*) (exprimées en mg de polluant/kg de matière sèche (MS)) collectées en zones témoin et impactée.**

	MS	Zn	As	Cd	Cu
	(%MB)	(mg/kg MS)	(mg/kg MS)	(mg/kg MS)	(mg/kg MS)
FICAIRE TEMOIN <i>partie aérienne</i>	10.04	69.7	1.99	0.2	10.96
FICAIRE ZONE IMPACTEE <i>partie aérienne</i>	8.79	151.3	1.14	0.11	11.38
FICAIRE TEMOIN <i>partie racinaire</i>	20.69	63.8	2.9	0.24	9.67
FICAIRE ZONE IMPACTEE <i>partie racinaire</i>	24.68	166.1	4.46	0.24	13.37

Ces résultats sont également rapportés dans les graphiques de la **Figure 10**.

Une analyse qualitative globale de ces résultats (tendances) donne les conclusions suivantes:

- les concentrations racinaires sont systématiquement plus élevées à hauteur de la zone impactée que de la zone témoin aussi bien l'arsenic, le cuivre et le zinc ; les concentrations racinaires en cadmium restent du même ordre de grandeur ;
- dans les parties aériennes, les concentrations en zinc sont également sensiblement plus importantes dans la zone impactée par la couche de cendre ; pour les autres éléments les concentrations mesurées sont globalement identiques. .

Pour le zinc, les concentrations mesurées en zone impactée sont globalement (racines et parties aériennes) 3 fois supérieures aux concentrations mesurées en zone témoin.

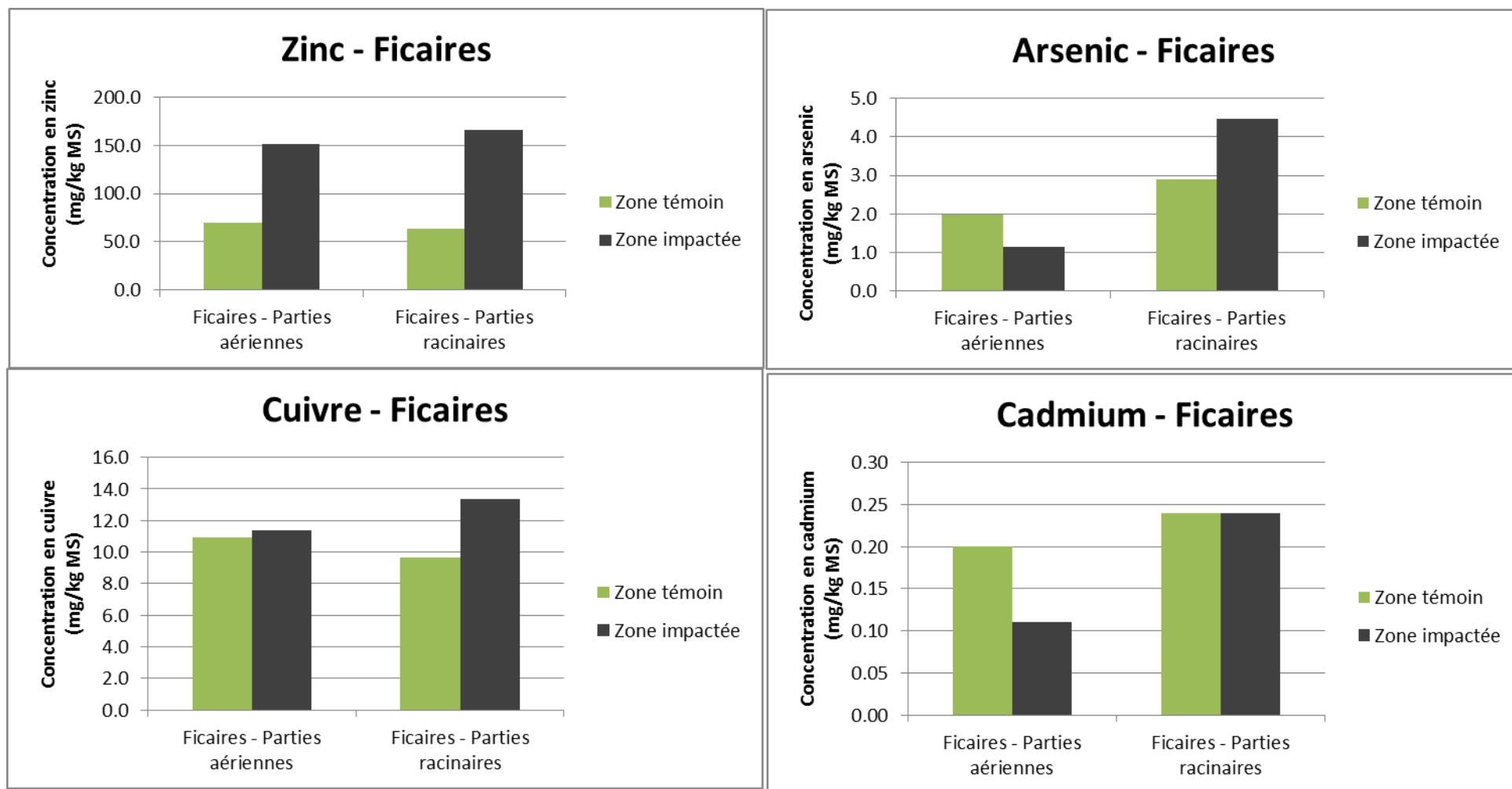


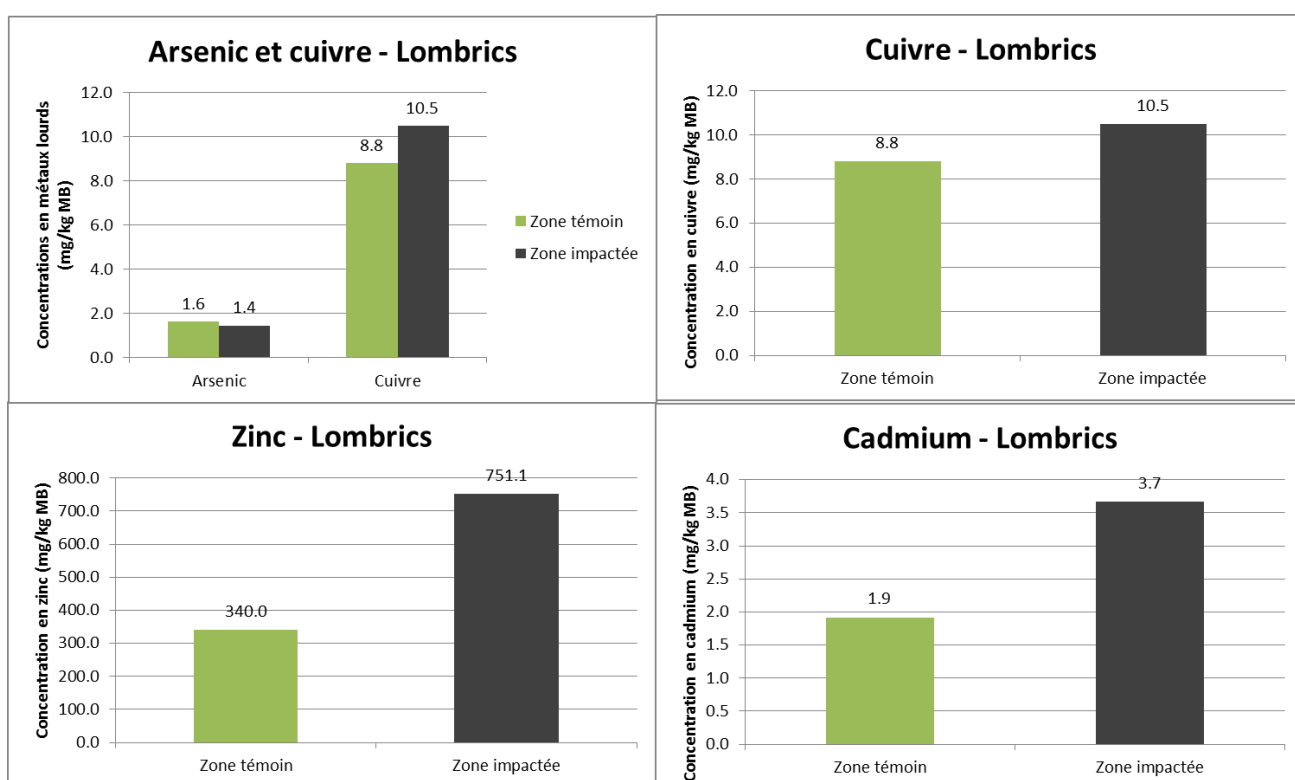
Figure 10 : Comparaison des concentrations en métaux lourds (en mg/kg de matière sèche) dans les ficaires (*Ranunculus ficaria*) prélevées dans les zones impactée et témoin.

### 5.3 Echantillons de vers

Les résultats ci-dessous (**Tableau 7 et Figure 11**) concernent les mesures en métaux lourds effectuées sur base d'échantillons de lombrics prélevés en zone impactée et en zone témoin :

**Tableau 7 : Concentrations en métaux lourds dans les lombrics (mg/kg de matière sèche, MS) collectés en zones témoin et impactée.**

	MS (%MB)	Zn (mg/kg MS)	As (mg/kg MS)	Cd (mg/kg MS)	Cu (mg/kg MS)
LOMBRICS ZONE TEMOIN	25.0	340.0	1.6	1.9	8.8
LOMBRICS ZONE IMPACTEE	21.0	751.1	1.4	3.7	10.5



**Figure 11 : Concentrations en métaux lourds (en mg/kg de matière brute) dans les lombrics et comparaison entre les zones des cendres (zone impactée, en noir) et zone témoin (en vert)**

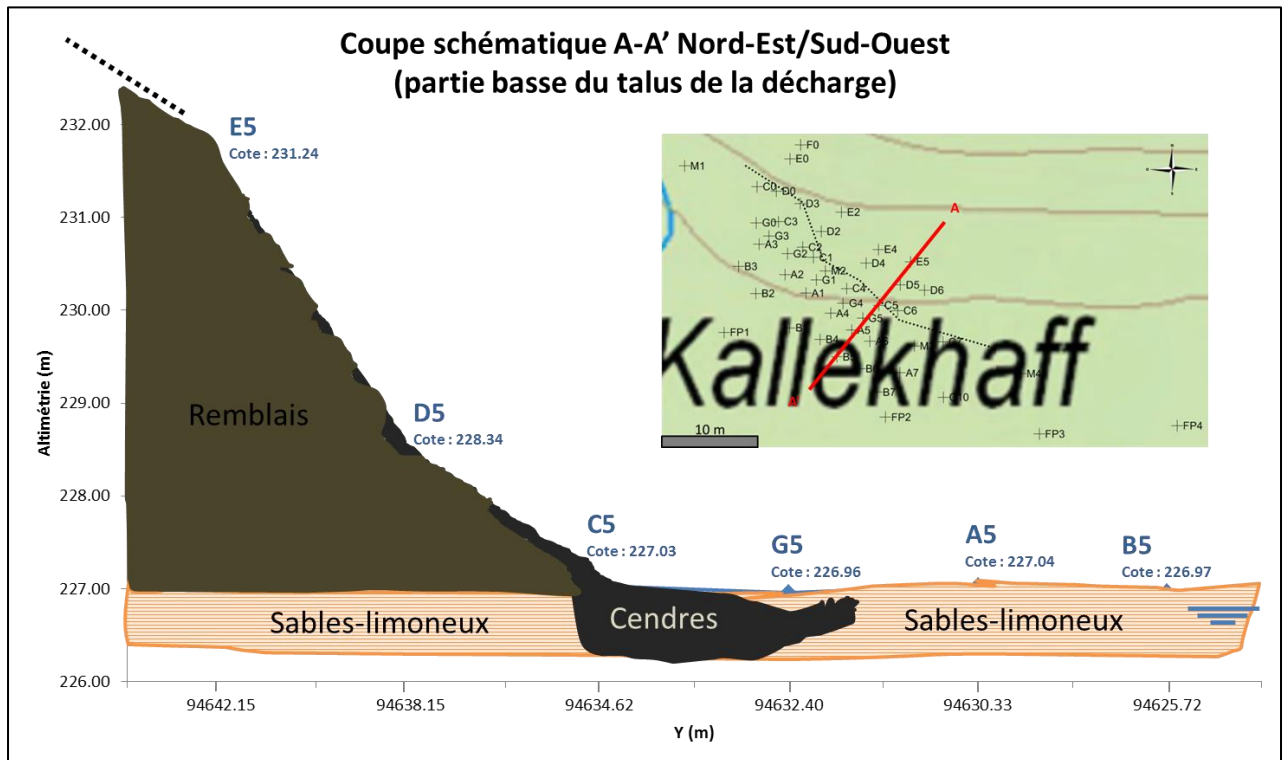
Sur le plan des tendances, à propos des concentrations en polluants mesurées dans les lombrics :

- il n'y a pas de différence (zone des cendres vs. témoin) dans les concentrations mesurées en arsenic,
- on observe une légère augmentation des concentrations du cuivre au niveau de la zone des cendres en comparaison avec la zone témoin,
- en revanche, en ce qui concerne le cadmium et le zinc, on observe une augmentation des concentrations de l'ordre d'un facteur deux entre la zone témoin et la zone des cendres .

## 6. Délimitation de l'étendue de la couche de cendres

### 6.1 Délimitation préliminaire de la couche de cendres sur base de l'examen visuel des échantillons prélevés

Les **Figure 12** et **Figure 13** fournissent deux transects réalisés à partir des données de terrain (cf. logs de forages) qui permettent une visualisation de la distribution supposée de la couche de cendres : elle s'étendrait de manière discontinue dans le début de la pente du talus (cf. Figure 12) ainsi que tout au long du pied de celui-ci (cf. Figure 13). Lorsqu'elle est présente à hauteur de la surface du sol, elle est intégrée tantôt à une couche d'humus tantôt à du limons.



**Figure 12 :** Coupe schématique A-A' Nord-Est/Sud-Ouest (partie basse du talus de la décharge).



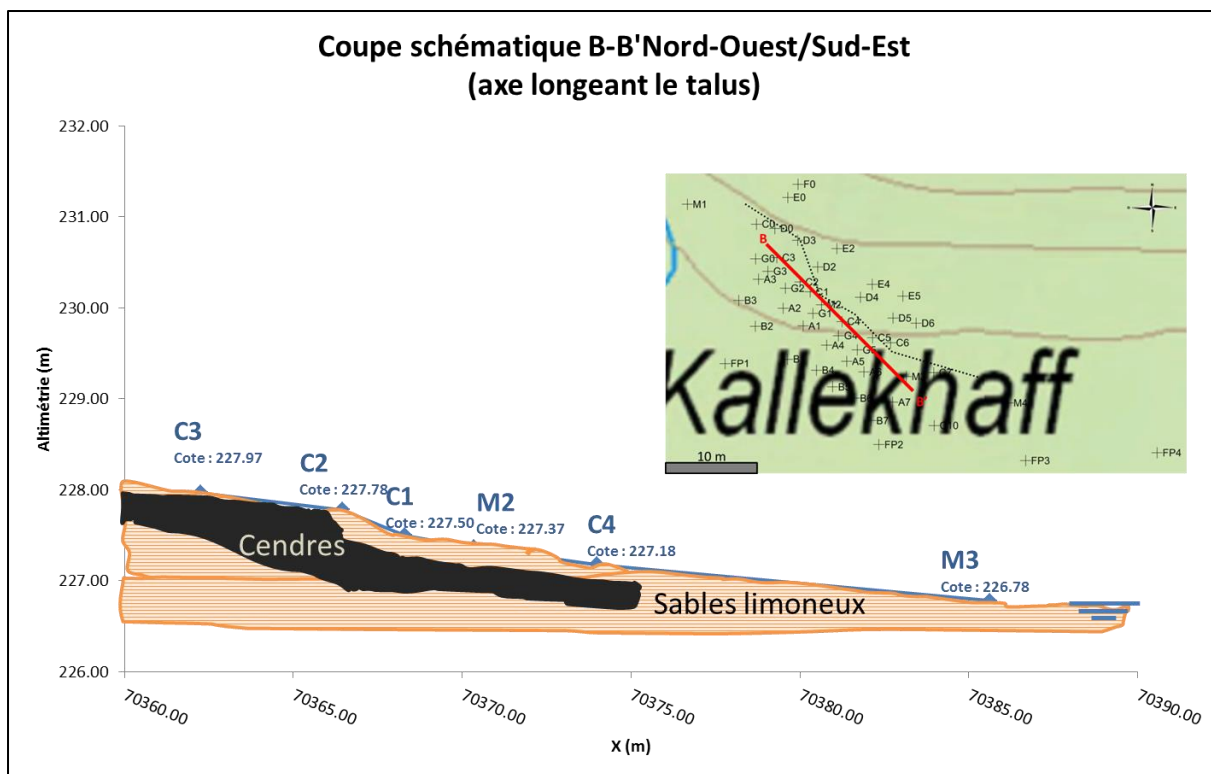


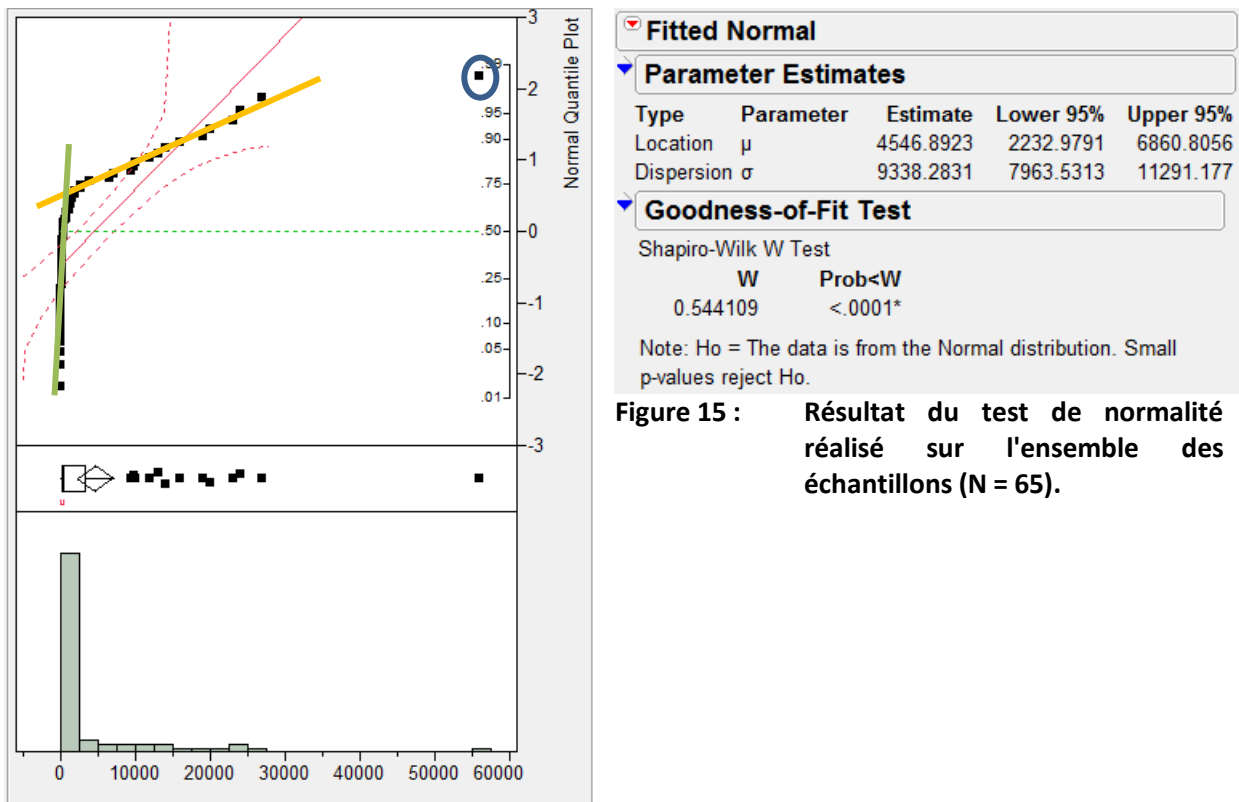
Figure 13 : Coupe schématique B-B' Nord-Ouest/Sud-Est (axe parallèle à la limite du talus).

## 6.2 Délimitation de la couche de cendres sur base de l'étude des concentrations en zinc

La **Figure 14** représente la distribution des concentrations en zinc dans le sol pour l'ensemble des échantillons analysés selon un graphique quantile-quantile plot (QQ-Plot ou *Normal Quantile Plot*). A l'examen de la comparaison de la fonction de répartition expérimentale à la fonction de répartition théorique d'une fonction normale, on observe que la distribution des concentrations en zinc présente une cassure reflétant vraisemblablement l'existence d'au moins deux populations statistiques (cf. Figure 14). Le test de normalité des données confirme cette observation (**Figure 15**).

Cette analyse de distribution met également en évidence l'existence d'un point marginal (cf. **cercle bleu** sur la Figure 14) dans les valeurs extrêmes de la distribution. Il s'agit de l'échantillon C1.1 situé en bordure de la limite du début du talus de la décharge et présentant une concentration en zinc de 56 000 mg/kg MS. Cet échantillon (C1.1) a été mesuré entre 0 et 20 cm du sol.

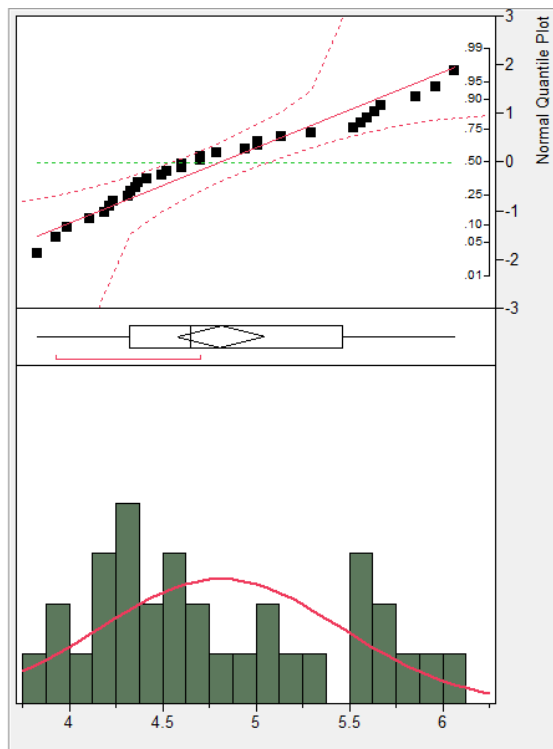
Suite à cette analyse, une première distinction de deux sous-populations a été réalisée. Les échantillons de la première sous-population ont été associés au groupe « hors tache de cendres » (avec N = 32 échantillons) et les échantillons de la seconde sous-population au groupe « tache de cendres » (avec N = 33 échantillons).



**Figure 15 :** Résultat du test de normalité réalisé sur l'ensemble des échantillons (N = 65).

**Figure 14 :** Distribution des concentrations en zinc (*Normal Quantile Plot* et histogramme) dans le sol (mg/kg MS) (N = 65).

Les distributions des concentrations de chacune de ces sous-populations a également été étudiée et sont représentées aux **Figure 16** et **Figure 17**.



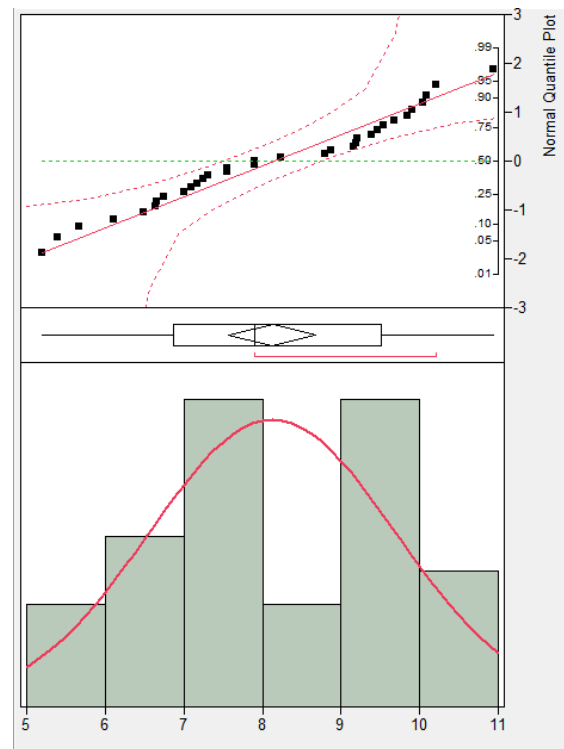
Fitted Normal				
Parameter Estimates				
Type	Parameter	Estimate	Lower 95%	Upper 95%
Location	$\mu$	4.8121041	4.5801156	5.0440927
Dispersion	$\sigma$	0.6434503	0.5158562	0.855454

Goodness-of-Fit Test		
Shapiro-Wilk W Test		
W	Prob<W	
0.938927	0.0698	

Note: Ho = The data is from the Normal distribution. Small p-values reject Ho.

**Figure 16 :** Distribution des logarithmes de concentrations en zinc 'hors couche de cendres' (N = 32) et résultat du test de normalité (Test de Shapiro-Wilk).



Fitted Normal				
Parameter Estimates				
Type	Parameter	Estimate	Lower 95%	Upper 95%
Location	$\mu$	8.1271716	7.5712161	8.6831271
Dispersion	$\sigma$	1.5679065	1.2608934	2.0738589

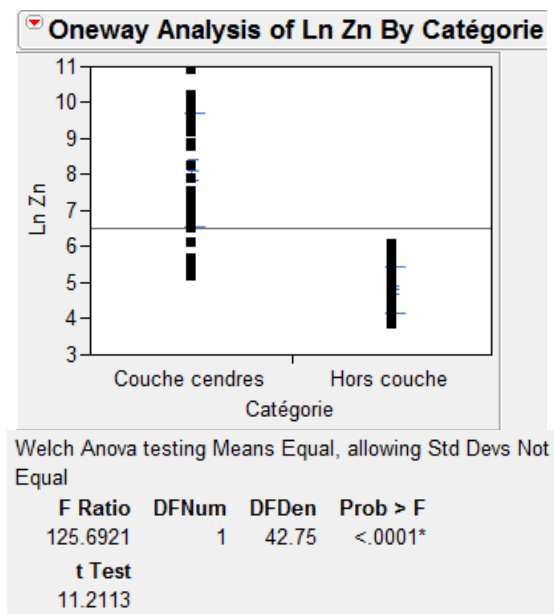
Goodness-of-Fit Test		
Shapiro-Wilk W Test		
W	Prob<W	
0.955906	0.1975	

Note: Ho = The data is from the Normal distribution. Small p-values reject Ho.

**Figure 17 :** Distribution des logarithmes de concentrations en zinc 'couche de cendres' (N = 33) et résultat du test de normalité (Test de Shapiro-Wilk).

L'observation de la distribution de ces sous-populations ainsi que les résultats des tests de normalité démontrent que l'hypothèse de normalité ne peut être rejetée (Test de Shapiro-Wilk).

Il a en outre été démontré (test de Welch) que la moyenne des concentrations de la 'couche de cendres' (N = 33) et la moyenne des concentrations des échantillons 'hors couche de cendres' (N = 32) étaient significativement différentes (cf. **Figure 18**).



**Figure 18 :** Test de comparaison des moyennes des logarithmes de concentrations en zinc (test de Welch) : ‘couche de cendres’ (N = 33) versus ‘hors couche de cendres’ (N= 32).

Les mesures en matière organique, réalisées sur l’ensemble des échantillons, consolident également cette distinction. En effet, en conséquence de sa combustion, le caoutchouc entrant dans la composition des pneus a laissé des résidus carbonés sur le terrain, les analyses de terrain montrent que les échantillons présentant les pourcentages en matière organique les plus importants se retrouvent effectivement systématiquement dans la sous-population des échantillons délimités dans la ‘couche de cendres’. Les médianes des pourcentages en matière organique des deux sous-populations ‘couche de cendres’ et ‘hors couche de cendres’ s’élèvent en effet respectivement à 18.5 % et 4.0 %.

Par ailleurs, l’analyse plus détaillée des 33 échantillons associés à la couche de cendres laisse apparaître à son tour deux sous-ensembles d’échantillons présentant des degrés de concentrations relativement distincts (on observe sur l’histogramme de la Figure 17, deux maxima de fréquence). Les concentrations associées au maxima le plus faible se situent globalement sous les 2500 mg/kg alors que les concentrations associées au maxima le plus élevé sont plutôt de l’ordre des dizaines de milliers de milligrammes en zinc. La confrontation entre ces échantillons et les observations visuelles en cours d’investigation nous ont permis de délimiter de manière plus précise encore la couche de cendres *sensu stricto* et de discerner les échantillons qui lui étaient plus particulièrement associés ; 18 échantillons ont ainsi été rattachés à la couche de cendres. En ce qui concerne les 15 autres échantillons, plusieurs hypothèses ont été émises :

- certains d’entre eux sont associés à la proximité des cendres (sous ou sus-jacente) et ont probablement été prélevés avec quelques résidus de celles-ci ou encore des résidus fins de ferrailles de pneus ;
- les autres peuvent provenir d’une contamination croisée au cours de l’échantillonnage ; en effet, malgré toutes les précautions prises lors du prélèvement à l’aide de la tarière pédologique, il n’est pas à exclure que de la terre ainsi que des cendres puissent avoir été emmenées au cours du prélèvement d’échantillons plus profonds.

A la lumière de ces résultats statistiques, et afin d'être complet et précautionneux en matière de risques (cf. §7.2, 7.3 et 7.4), deux approches vont être suivies pour l'étude :

- une approche **conservatoire** où la couche de cendres est constituée de 33 échantillons identifiés par l'analyse statistiques (cf. **cerclés vert** de la **Figure 19**) et ;
- une approche **réaliste** où la couche de cendres est constituée de 18 échantillons identifiés comme étant représentatifs de la couche de cendres *sensu stricto* (cf. **losanges orange** de la **Figure 20**) (les échantillons concernés sont rapportés à l'**Annexe 6**).

### **6.3 Estimation de l'extension de la couche de cendres**

L'extension de la couche de cendres au pied de la décharge a été estimée en combinant l'examen visuel des échantillons prélevés (cf. §6.1) et l'analyse de la distribution des concentrations en zinc (cf. §6.2).

A l'aide des données de géoréférencement (cf. **Annexe 1**), des données de concentrations en zinc et de l'étude de la délimitation du volume par la méthode décrite ci-dessus, une représentation 3D de la couche de cendres selon l'approche réaliste et selon l'approche conservatoire a été réalisée<sup>19</sup> (cf. **Annexe 7**), celle-ci permet de visualiser les extensions de la couche de cendres (réalisée par interpolation) à hauteur du pied de la décharge « Est » et jusqu'au début de son talus.

**Selon l'approche conservatoire**, l'extension des cendres au pied de la décharge<sup>20</sup> s'étend sur 315 m<sup>2</sup> latéralement et sur une profondeur de 80 cm représentant ainsi un volume de cendres estimé à 212 m<sup>3</sup>.

**Selon l'approche réaliste**, l'extension des cendres au pied de la décharge<sup>21</sup> s'étend sur 220 m<sup>2</sup> latéralement et sur une profondeur de 40 cm représentant ainsi un volume de cendres estimé à 133 m<sup>3</sup>.

---

<sup>19</sup> La représentation 3D a été réalisée à l'aide du logiciel Voxler 2 (Golden Software).

<sup>20</sup> C'est-à-dire en excluant les échantillons prélevés au-delà de la limite du talus (délimitée en pointillé sur la Figure 18 par exemple).

<sup>21</sup> C'est-à-dire en excluant les échantillons prélevés au-delà de la limite du talus (délimitée en pointillé sur la Figure 18 par exemple).

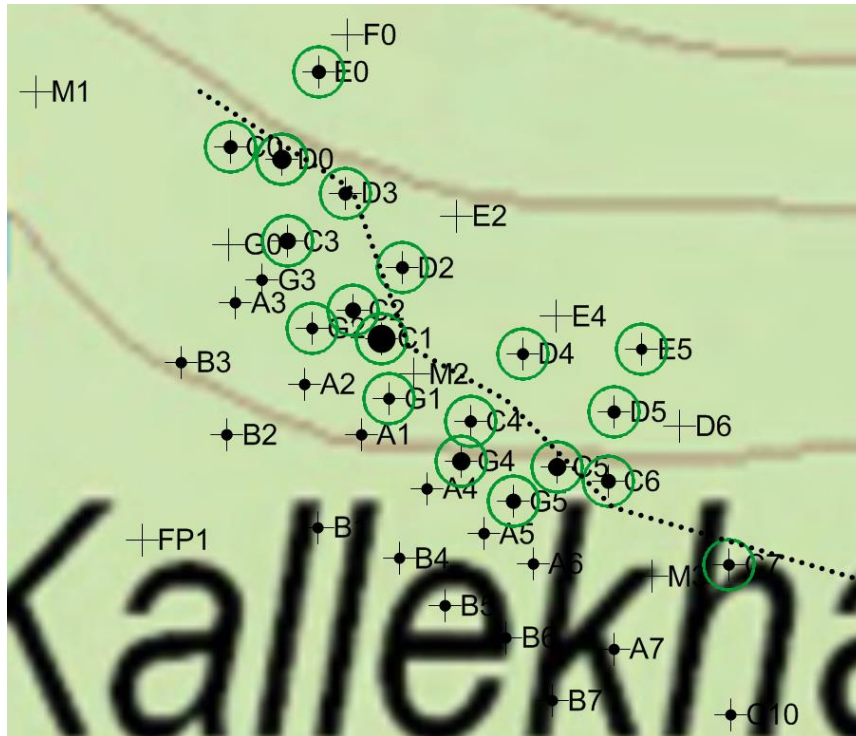


Figure 19 : Concentrations en zinc (cercles pleins noirs dont la taille est directement proportionnelle à la concentration) et identification des échantillons selon l'approche conservatoire (cercles verts). La ligne en pointillé noire représente la délimitation de la base du talus de la décharge.

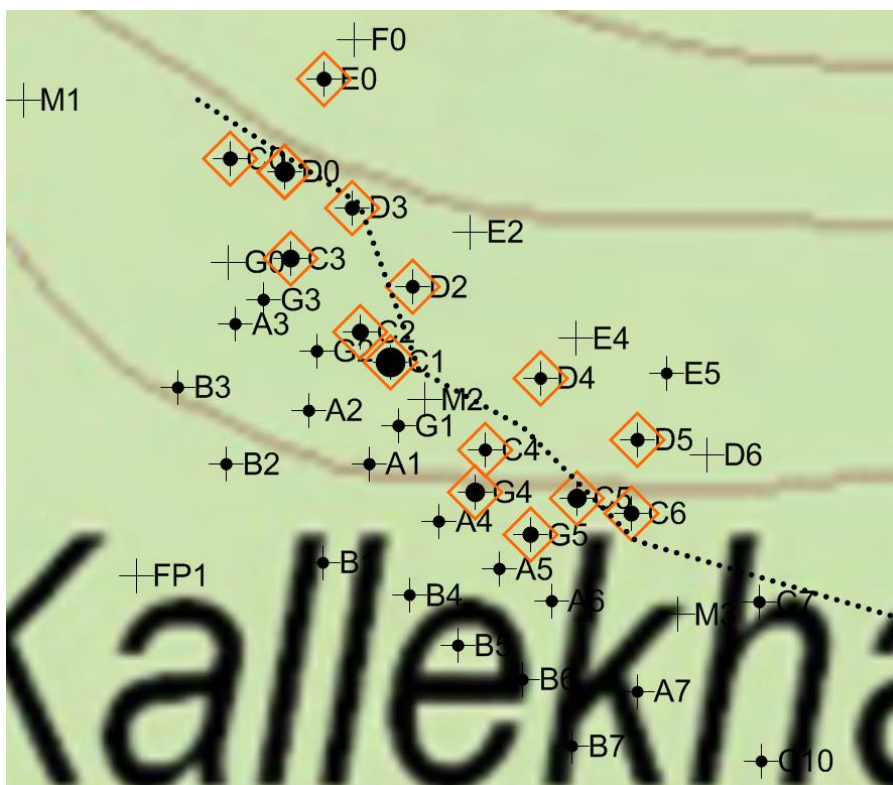


Figure 20 : Concentrations en zinc (cercles pleins noirs dont la taille est directement proportionnelle à la concentration) et identification des échantillons selon l'approche réaliste (losanges orange). La ligne en pointillé noire représente la délimitation de la base du talus de la décharge.

## 7. Caractérisation préliminaire des risques

### 7.1 Hypothèses de travail et concentrations représentatives pour l'étude de risques

L'étude de risques envers la santé humaine, les eaux souterraines et les écosystèmes (dénommés ci-après respectivement ER-SH, ER-N et ER-E) a été réalisée pour le zinc, le cuivre et le cadmium tel que défini dans l'offre Ram-Ses et en accord avec l'Administration de l'Environnement<sup>22</sup>.

Les concentrations représentatives ont été déterminées sur base de l'étude de la couche de cendres. Ainsi, des concentrations ont été calculées respectivement :

- pour la zone impactée par la 'couche de cendres', selon chacune des approches (approche réaliste *versus* conservatoire) telles que définies au §6,
- pour la zone 'hors couche de cendres'.

Ces concentrations représentatives, utilisées pour le calcul d'Indice de Risques, sont reprises dans le tableau ci-dessous (**Tableau 8**).

**Tableau 8: Concentrations représentatives en cadmium, en cuivre et en zinc (exprimées en mg de polluant/kg de sol sec) dans la couche de cendres pour l'étude de risques (santé, eau et écosystèmes) : zone impactée *versus* zone non-impactée (approches réaliste et conservatoire).**

Polluant	Valeurs de Référence luxembourgeoises	Zone impactée (couche de cendres)			
		Approche conservatoire (N = 33)		Approche réaliste (N = 18)	
		Médiane	Percentile-90	Médiane	Percentile-90
		mg/kg sol MS		mg/kg sol MS	
Cd	0.4	0.35	1.6	0.9	2.47
Cu	27	110	1076	350	1320
Zn	211	2700	22400	12500	24900
Polluant	Valeurs de Référence luxembourgeoises	Zone non-impactée (hors couche de cendres)			
		Approche conservatoire (N = 32)		Approche réaliste (N = 47)	
		Médiane	Percentile-90	Médiane	Percentile-90
		mg/kg sol MS		mg/kg sol MS	
Cd	0.4	0.2	0.38	0.2	0.4
Cu	27	9.6	15	11	23.4
Zn	211	105	289	180	1240

A titre comparatif et indicatif, les valeurs de référence (VR) proposées dans le cadre de l'APL-sol ont également été rapportées dans ce tableau (colonne n°2). On observe que les concentrations représentatives de la zone non-impactée, à l'exception du percentile-90 du zinc selon l'approche réaliste, sont majoritairement de l'ordre de ces valeurs de référence.

### 7.2 Risques pour la santé humaine

Le principe de l'évaluation des risques repose sur le calcul d'une dose d'exposition (exprimée en mg/kg <sub>poids corporel</sub>/jour) pour une cible étudiée (cf. *infra*) à comparer avec une Valeur Toxicologique de Référence (VTR)<sup>23</sup> c'est-à-dire une dose considérée comme acceptable. Le rapport de la dose d'exposition à la VTR permet d'obtenir un Indice de Risques (IR). Un IR inférieur à 1 signifie que les risques sont acceptables. Dans le cadre de cette étude, les risques potentiels liés aux concentrations

<sup>22</sup> Dans le cadre de l'ER-N, seul le lessivage du zinc a été étudié.

<sup>23</sup> Les VTR sont en outre distinguées pour chacune des voies d'administration : voie orale et voie inhalatoire.

en métaux lourds mesurées à hauteur de la zone impactée (couche de cendres) *versus* non-impactée ont été évalués pour un usage du sol de type naturel.

Le Modèle Conceptuel de Site (MCS), décrivant la situation relative à la pollution du sol et fournissant une représentation des liens entre celle-ci, les propriétés physico-chimiques des polluants, les voies de transfert/d'exposition et les impacts potentiels sur les différentes cibles susceptibles d'être présentes (adulte et enfant) a été établi en prenant les hypothèses suivantes :

- les **cibles** considérées sont l'enfant et l'adulte accompagnant (en considérant que le site est une zone récréative) ;
- ces cibles passent 5 h par jour à l'extérieur, 230 jours par an ; la moyenne annuelle des heures d'exposition quotidiennes à l'extérieur est de 3.29 heure par jour<sup>24</sup>;
- enfin, les **voies d'exposition** (voies de transfert) considérées dans ce scénario sont : l'inhalation d'air extérieur, l'inhalation de sol, l'ingestion de sol, l'ingestion d'eau de boisson et le contact cutané avec le sol.

Les **sources de pollution** considérées sont le zinc, le cadmium et le cuivre et les concentrations représentatives de ces polluants dans le sol sont celles reprises au **Tableau 8**.

La répartition des temps d'exposition pour scénario récréatif sans bâti sont repris au tableau suivant (**Tableau 9**).

**Tableau 9 : Répartition du temps d'exposition d'un enfant ou d'un adulte pour un usage récréatif sans bâti.**

Usage de type récréatif sans bâti (IVb) – Cible : enfant ou adulte							
		HIVER			ETE		
		h/j	j/sem	sem/an	h/j	j/sem	sem/an
<b>JOURS DE CONGE</b>							
A l'extérieur	Inhalation	5	2	25	5	2	25
	Contact dermique	5	2	25	5	2	25
<b>JOURS D'ECOLE ou DE TRAVAIL</b>							
A l'extérieur	Inhalation	5	2.6	25	5	2.6	25
	Contact dermique	5	2.6	25	5	2.6	25

Les risques associés au zinc, au cadmium et au cuivre ont été estimés sur base des équations du modèle C-SOIL pour chacune des approches décrites *supra* et des percentiles-90 des concentrations de chaque polluant (cf. Tableau 8). Les propriétés physico-chimiques sous-jacentes aux polluants et reprises pour la présente étude de risques sont issues de l'annexe B4 du GRER partie B (utilisé en Wallonie) et reprises à l'**Annexe 8** du présent rapport. Les valeurs toxicologiques retenues sont issues de l'Annexe B5 du GRER partie B.

Les doses et IR établis à partir des concentrations représentatives, des paramètres d'exposition de la cible humaine (adulte et enfant) et des voies d'exposition pertinentes sont rapportés aux **Tableau 10**, **Tableau 11** et **Tableau 12** respectivement pour le zinc, le cadmium et le cuivre.

<sup>24</sup> Ces paramètres sont issus de l'Annexe B3 du GRER partie B, d'application en Wallonie et disponible sous ce lien : [https://dps.environnement.wallonie.be/files/Document/CWBP/V02/GRER/PARTIE\\_B/ANNEXES/GRER\\_Annexe-B-3-V02.pdf](https://dps.environnement.wallonie.be/files/Document/CWBP/V02/GRER/PARTIE_B/ANNEXES/GRER_Annexe-B-3-V02.pdf).



**Tableau 10 : Résultats des calculs de doses d'exposition (mg/kg<sub>poids corporel</sub>/jour) et d'indices de risques pour le zinc.**

ZINC		Enfant		Adulte	
Substance non-cancérogène EFFETS A SEUIL	Unités	Approche conservatoire (N = 33)	Approche réaliste (N = 18)	Approche conservatoire (N = 33)	Approche réaliste (N = 18)
Concentration Représentative dans la couche de cendres (p-90)	mg/kg <sub>sol</sub>	22 400	24 900	22 400	24 900
Inhalation sol et poussières	mg/kg <sub>p.c</sub> /jour	8.24 <sup>E</sup> -05	9.16 <sup>E</sup> -05	4.58 <sup>E</sup> -05	5.09 <sup>E</sup> -05
Ingestion de sol	mg/kg <sub>p.c</sub> /jour	1.96 <sup>E</sup> -01	2.18 <sup>E</sup> -01	2.10 <sup>E</sup> -02	2.34 <sup>E</sup> -02
VTR <sub>or</sub>	mg/kg <sub>p.c</sub> /jour	1.00 <sup>E</sup> +00		1.00 <sup>E</sup> +00	
VTR <sub>inh</sub>	mg/kg <sub>p.c</sub> /jour	9.22 <sup>E</sup> -03		5.12 <sup>E</sup> -03	
IR <sub>or</sub>	-	1.96 <sup>E</sup> -01	2.18 <sup>E</sup> -01	2.10 <sup>E</sup> -02	2.34 <sup>E</sup> -02
IR <sub>inh</sub>	-	8.94 <sup>E</sup> -03	9.94 <sup>E</sup> -03	8.94 <sup>E</sup> -03	9.94 <sup>E</sup> -03
<b>IR total</b>	-	<b>2.05<sup>E</sup>-01</b>	<b>2.28<sup>E</sup>-01</b>	<b>3.00<sup>E</sup>-02</b>	<b>3.33<sup>E</sup>-02</b>

**Tableau 11 : Résultats des calculs de doses d'exposition (mg/kg<sub>poids corporel</sub>/jour) et d'indices de risques pour le cadmium.**

CADMIUM		Enfant		Adulte	
Substance non-cancérogène EFFETS A SEUIL	Unités	Approche conservatoire (N = 33)	Approche réaliste (N = 18)	Approche conservatoire (N = 33)	Approche réaliste (N = 18)
Concentration Représentative (p-90)	mg/kg <sub>sol</sub>	1.6	2.47	1.6	2.47
Inhalation sol et poussières	mg/kg <sub>p.c</sub> /jour	5.89 <sup>E</sup> -09	9.09 <sup>E</sup> -09	3.27 <sup>E</sup> -09	5.05 <sup>E</sup> -09
Ingestion de sol	mg/kg <sub>p.c</sub> /jour	1.40 <sup>E</sup> -05	2.16 <sup>E</sup> -05	1.50 <sup>E</sup> -06	2.32 <sup>E</sup> -06
VTR <sub>or</sub>	mg/kg <sub>p.c</sub> /jour	1.00 <sup>E</sup> -03		1.00 <sup>E</sup> -03	
VTR <sub>inh</sub>	mg/kg <sub>p.c</sub> /jour	2.56 <sup>E</sup> -06		1.42 <sup>E</sup> -06	
IR <sub>or</sub>	-	1.40 <sup>E</sup> -02	2.16 <sup>E</sup> -02	1.50 <sup>E</sup> -03	2.32 <sup>E</sup> -03
IR <sub>inh</sub>	-	2.30 <sup>E</sup> -03	3.55 <sup>E</sup> -03	2.30 <sup>E</sup> -03	3.55 <sup>E</sup> -03
<b>IR total</b>	-	<b>1.63<sup>E</sup>-02</b>	<b>2.52<sup>E</sup>-02</b>	<b>3.80<sup>E</sup>-03</b>	<b>5.87<sup>E</sup>-03</b>

**Tableau 12 : Résultats des calculs de doses d'exposition (mg/kg<sub>poids corporel</sub>/jour) et d'indices de risques pour le cuivre.**

CUIVRE		Enfant		Adulte	
Substance non-cancérogène EFFETS A SEUIL	Unités	Approche conservatoire (N = 33)	Approche réaliste (N = 18)	Approche conservatoire (N = 33)	Approche réaliste (N = 18)
Concentration Représentative (p-90)	mg/kg <sub>sol</sub>	1076	1320	1076	1320
Inhalation sol et poussières	mg/kg <sub>p.c</sub> /jour	3.96 <sup>E</sup> -06	4.86 <sup>E</sup> -06	2.20 <sup>E</sup> -06	2.70 <sup>E</sup> -06
Ingestion de sol	mg/kg <sub>p.c</sub> /jour	9.43 <sup>E</sup> -03	1.16 <sup>E</sup> -02	1.01 <sup>E</sup> -03	1.24 <sup>E</sup> -03
VTR <sub>or</sub>	mg/kg <sub>p.c</sub> /jour	1.40 <sup>E</sup> -01		1.40 <sup>E</sup> -01	
VTR <sub>inh</sub>	mg/kg <sub>p.c</sub> /jour	5.12 <sup>E</sup> -04		2.85 <sup>E</sup> -04	
IR <sub>or</sub>	-	6.73 <sup>E</sup> -02	8.26 <sup>E</sup> -02	7.22 <sup>E</sup> -03	8.85 <sup>E</sup> -03
IR <sub>inh</sub>	-	7.73 <sup>E</sup> -03	9.49 <sup>E</sup> -03	7.73 <sup>E</sup> -03	9.49 <sup>E</sup> -03
<b>IR total</b>	-	<b>7.51<sup>E</sup>-02</b>	<b>9.21<sup>E</sup>-02</b>	<b>1.49<sup>E</sup>-02</b>	<b>1.83<sup>E</sup>-02</b>

Comme en témoignent les résultats de l'évaluation des risques, les doses d'exposition susceptibles d'être encourues par des enfants ou des adultes qui se promèneraient dans la zone d'étude sont largement inférieures aux doses maximales acceptables. En d'autres termes, sur base des hypothèses émises, les risques pour la santé humaine associés à la présence de Zn, Cd et Cu dans la couche de cendres peuvent être exclus.

### **7.3 Risques pour les eaux souterraines et de surface**

#### **7.3.1 Méthodologie et hypothèses de travail**

Les analyses réalisées en 2013 dans le cadre de l'étude de Luxcontrol (rapport final, 2013) avaient conclu :

- à l'absence d'impact sur la qualité de l'eau souterraine à l'aval hydrogéologique immédiat de la zone du dépôt de cendres (piézomètres FP1 à FP6) ;
- à l'absence d'impact<sup>25</sup> de la zone polluée sur la qualité de l'eau de l'Attert (un échantillon).

La présente partie de l'étude des risques s'attache à consolider l'hypothèse d'une absence de risque pour les eaux souterraines et de surface qui pouvait être anticipée d'après ces résultats en étudiant le transfert de la pollution vers le milieu aquatique :

- pour les eaux de surface : évaluation du risque lié à l'entraînement de particules de cendres vers l'Attert lors d'épisodes de crues ;
- pour les eaux souterraines, évaluation des risques par la voie de la modélisation :
  - o d'une part sur l'axe vertical : modélisation du lessivage polluants contenus dans la couche de cendres sous l'effet de la partie infiltrée des précipitations ;
  - o d'autre part sur l'axe horizontal : modélisation du transport et de la dispersion des polluants (dans l'hypothèse où ils rejoindraient la nappe) dans l'eau souterraine.

##### ***7.3.1.1 Evaluation des risques pour les eaux de surface lors d'épisodes de crues***

Pour l'évaluation des risques pour les eaux de surface, les sources, voies de transfert et cibles suivantes ont été considérées :

- source : les cendres présentes en surface<sup>26</sup> ;
- cible : Attert et ses sédiments ;
- voie de transfert : l'entraînement des particules de cendres en cas d'inondations.

Ce travail a été réalisé en se basant sur la carte tirée du géoportail luxembourgeois dédié à la gestion de l'eau ([www.eau.geoportail.lu](http://www.eau.geoportail.lu)) représentant :

- la zone inondable associée à une crue de probabilité d'occurrence moyenne (tous les 100 ans) (Figure 21),
- ainsi que les profils en travers associés (les profils 1 et 2 localisés sur la Figure 21 sont consultables en Annexe 9).

<sup>25</sup> À noter la détection de traces d'hydrocarbures et de PCB dans l'aire des piézomètres FP2 et FP3, commentée dans le rapport Luxcontrol (2013).

<sup>26</sup> Les dépôts de cendres non-affleurants n'ont pas été considérés.



**Figure 21 :** Représentation de la zone inondable associée à une crue de probabilité d'occurrence moyenne (en bleu clair, HQ100 : temps de retour tous les 100 ans – carte tirée de [www.geoportail.lu](http://www.geoportail.lu)), et localisation du dépôt de cendre pour la partie présente en surface (en jaune). Les profils en travers disponibles sont indiqués par des lignes vertes.

### 7.3.1.2 Evaluation des risques pour les eaux souterraines

Pour les eaux souterraines, les calculs sur les transferts ont été effectués pour le zinc, qui est l'élément présentant le risque majeur compte tenu des concentrations existant dans la couche de cendres.

La modélisation du lessivage du Zn a été réalisée à l'aide du logiciel F-LEACH<sup>27</sup>. L'**Annexe 10** reprend les paramètres de la zone saturée et non saturée ainsi que la concentration en zinc dans le sol qui ont été introduits comme données d'entrée. Il s'agit de valeurs représentatives du site déduites des observations et mesures effectuées ou de valeurs par défaut qui sont justifiées dans le tableau.

Deux des paramètres méritent une attention plus particulière :

- concernant les données d'entrée de concentration en Zn (soit les valeurs de concentrations au temps 0 de la période de simulation du lessivage) : optant pour une approche de type « précautionneuse », c'est la concentration maximale en zinc mesurée dans le sol qui a été retenue. Pour les besoins de la modélisation du lessivage, le profil de sol a été séquencé en

<sup>27</sup> Logiciel Version 2.1, 2011 développé par l'OVAM en Flandre (Belgique) et dont l'utilisation est reconnue selon les méthodes de référence en Wallonie (GRER, v2.0).

trois couches jusqu'à la limite inférieure de la zone vadose (établie à 60 cm de profondeur en moyenne d'après les observations de terrain); pour chaque couche, la concentration en Zn utilisée comme donnée d'entrée est la valeur maximale des concentrations mesurées aux différents points de sondage entre les limites de profondeur considérées. Ces valeurs sont :

- entre 0 – 20 cm : 56 000 mg Zn/kg sol ;
  - entre 20 – 40 cm : 24 000 mg Zn/kg sol ;
  - entre 40 – 60 cm : 2700 mg Zn/kg sol.
- le coefficient de partage sol/eau ( $K_d$ ) – qui constitue un parmi les paramètres les plus sensibles de la modélisation - a été estimé au départ des propriétés du sol en utilisant une équation prédictive<sup>28</sup> extraite du Guide de Référence pour les Etudes de Risques (GRER, v02) utilisé en Wallonie. La valeur du paramètre  $K_d$  estimée comme applicable pour le site et qui a été introduite comme donnée d'entrée du modèle est de 3489 L/kg.

La modélisation du transport et de la dispersion du Zn dans la zone saturée a été réalisée à l'aide du logiciel BIOSCREEN-AT-v1.43\_FR<sup>29</sup>. Partant d'une concentration donnée en Zn dans l'eau souterraine au droit de la couche de cendres, le programme permet de déterminer la concentration résiduelle du Zn dans l'eau tout point situé à une distance  $x$  du point d'origine et après un temps ' $t$ ' donné<sup>30</sup>.

Dans la présente évaluation :

- la valeur de temps ' $t$ ' considérée a été fixée à 100 ans,
- à défaut de mesure directe de la concentration en Zn dans la nappe au droit de la couche de cendres, ce sont les concentrations au point d'origine des valeurs déduites de la simulation du lessivage (F-LEACH) après trois incréments de temps différents qui ont été successivement introduites comme donnée d'entrée dans le logiciel (cf. Tableau 13).

Les autres paramètres d'entrée sont présentés à l'**Annexe 11**.

### 7.3.2 Résultats

#### 7.3.2.1 *Pour les eaux de surface par entraînement direct de cendres lors d'épisodes de crues*

La superposition cartographique de la localisation de la couche de cendres présente en surface et de la surface de la zone inondable montre que le risque d'entraînement de particules de cendres vers l'Attert ne peut être totalement exclu.

Toutefois il faut remarquer :

- que la surface concernée est très limitée de l'ordre de 20 à 30 m<sup>2</sup> au plus (points C5 et C6 sur la figure 20)
- que les observations de terrain ont montré déjà un certain mélange des cendres existant en surface avec des matériaux humifères (produits de la décomposition de la litière depuis la

<sup>28</sup> Il s'agit d'une fonction de pedotransfert déduite du traitement statistique d'un jeu de 79 données relatives à des mesures directes de la partition sol:eau dans des conditions in situ (Field  $K_d$ )

<sup>29</sup> Logiciel développé par l'EPA et traduit en français (avec conversion d'unités) pour son utilisation en Wallonie dans les études simplifiées des risques de « dispersion ». Il met en œuvre les équations de Domenico (1987) permettant de décrire l'atténuation de la concentration en polluant selon la direction principale de l'écoulement souterrain lors de son transport par advection unidirectionnelle au sein d'un aquifère par dispersion, biodégradation (celle-ci est fixée à zéro dans le cadre des études simplifiées) et adsorption. La source de pollution est supposée infinie et est représentée par une surface plane, aux dimensions finies placée verticalement et perpendiculairement au flux d'eau souterrain.

<sup>30</sup> BIOSCREEN est fondé sur l'équation générale de Domenico qui considère dans ses hypothèses l'existence d'une source de pollution infinie assurant une concentration dans l'eau constante au point 0 de l'axe des distances.

date de l'incendie) : ce début de re-développement de la couche humifère de surface pourrait encore atténuer le risque d'entraînement des cendres.

En conséquence il faut considérer que le risque pour les eaux de surface (en ce compris le dépôt dans les sédiments de l'Attert) , même s'il ne peut être totalement exclu, est selon toute vraisemblance très limité (très faible probabilité d'incidence pour la qualité des eaux).

### 7.3.2.2 Pour les eaux souterraines

Les résultats de **modélisation du lessivage** sont présentés **Tableau 13** ainsi qu'en **Annexe 12** (rapport du logiciel).

Le **Tableau 13** rapporte les concentrations attendues dans l'eau souterraine à différents pas de temps, comme suite aux effets du lessivage avec la partie infiltrée des précipitations. Il faut noter que la concentration de 220 µg/L calculée dès le premier pas de temps de la simulation est le résultat de l'équation d'équilibre appliquée par le logiciel F-LEACH à partir de la concentration initiale dans le sol à hauteur de la couche sus-jacente au niveau de l'eau souterraine (couche N°3), soit 2700 mg Zn/kg sol (cf. §7.3.1). A la concentration d'équilibre dans l'eau porale de la couche N°3 (773 µg/L) est appliqué, selon les paramètres caractéristiques de la nappe qui ont été introduits (cf. annexe 9), un facteur de dilution dans l'eau de la nappe d'une valeur de 3.5 (caractéristique des limons), donnant au final une estimation de la concentration dans l'eau souterraine de 220 µg/L.

Selon les calculs effectués, le temps estimé pour que le zinc atteigne la nappe et y produise un premier relèvement mesurable des concentrations (par rapport à la concentration d'équilibre initiale) serait de l'ordre de 500 ans.

Si l'on se réfère à un objectif de qualité de 530 µg/L<sup>31</sup>, les résultats obtenus montrent qu'il faudrait 1350 ans pour que le lessivage de la masse de Zn présente conduise à atteindre ce seuil (cf. Annexe 12).

**Tableau 13 :** Concentrations en zinc modélisées dans l'eau souterraine (en µg/L) au droit de la couche de cendres.

Pas de temps	Concentrations en zinc estimées dans l'eau souterraine (µg/L)
0 – 10 ans	220
10 – 50 ans	220
50 – 100 ans	220
100 – 500 ans	226
500 – 1000 ans	363
1000 – 4000 ans	1973

La consistance générale des résultats de la modélisation du lessivage (soit les valeurs du Tableau 13 et les évolutions avec le temps de la distribution des concentrations en Zn dans le sol reprises en annexe 11) a été testée de deux manières :

- test de la cohérence de la valeur du coefficient de partage sol/eau retenue ( $K_d = 3489$  L/kg) : on peut démontrer que si on applique cette valeur pour estimer *a priori* les valeurs de concentration en Zn dans l'eau souterraine à des endroits témoins hors de la zone

<sup>31</sup> Valeur en projet dans le cadre des travaux DECLAM.

d'influence de la couche de cendre, les calculs donnent – partant d'une concentration totale en Zn dans le sol de 211 mg/kg équivalente à la Valeur de Référence - comme estimation une valeur de 17 µg/L. Cette valeur est cohérente dans son ordre de grandeur avec les valeurs mesurées dans l'eau par Luxcontrol lors de leur campagne d'échantillonnage des piézomètres FP1 à FP6 situés en périphérie de la zone des cendres (moyenne de 2 µg/L) ;

- modélisation « en retour à l'observé » des concentrations en Zn mesurées dans le sol dans la couche située en dessous de la couche de cendres : si l'on s'adresse au point de forage G4 (en tant qu'exemple de point de forage où l'on a mesuré des concentrations en Zn sous la couche de cendres significativement supérieures aux teneurs habituelles) on peut montrer que la concentration en Zn mesurée aujourd'hui dans la couche N°3 (soit 850 mg Zn/kg) peut être retrouvée dans son ordre de grandeur par F-LEACH. En effet, si on utilise comme données d'entrée :
  - les concentrations en Zn telles qu'elles ont été mesurées dans les couches N°1 et 2 (respectivement : 220 mg/kg et 24.000 mg/kg),
  - une période de lessivage de 40 années (soit le temps de lessivage passé depuis le moment où la pollution a été générée),
  - et tous les autres paramètres comme précédemment,la valeur calculée de concentration de la couche N°3 (40-80 cm) équivaut à une valeur de l'ordre de 720 mg Zn/kg de sol, proche de la valeur effectivement mesurée de 850 mg Zn/kg (cf. Annexe 4).

En conséquence, les résultats du calcul du lessivage (Tableau 13) peuvent être considérés comme cohérents. Ces résultats indiquent que le zinc en place et sous les conditions environnementales actuelles ne subit pas de transport significatif (lessivage) à même de compromettre significativement la qualité de l'eau souterraine endéans un intervalle de temps réaliste (pas une menace pour l'eau souterraine).

En conséquence également, on peut considérer que les valeurs simulées des concentrations en Zn dans l'eau souterraines (220 µg/L) constituent une bonne approximation des valeurs maximales qui seraient mesurables dans l'eau de la couche saturée qui existe au droit de la couche de cendres (si on y installait des piézomètres en vue de son échantillonnage et analyse par exemple)<sup>32</sup>. Cette valeur de 220 µg/L est supérieure à la valeur-guide d'assainissement "oSW" du système d'interprétation des valeurs de concentration Merkblatt Alex02 (100 µg/L) et inférieure à la valeur-guide d'intervention "oPW" (300 µg/L). Elle est cependant sans effet toxique pour l'homme (dans l'hypothèse d'une consommation).

En ce qui concerne la **modélisation de la dispersion**, plusieurs essais ont été réalisés en implémentant de manière croissante la concentration initiale en zinc dans l'eau souterraine (au droit de la couche de cendres). Ces simulations ont ainsi été effectuées pour les concentrations en zinc dans l'eau souterraine issues des résultats de lessivage (cf. Tableau 13).

Les résultats de l'étude de la dispersion réalisée à l'aide de BIOSCREEN-AT-v1.43\_FR (cf. **Annexe 11**) montrent que sous les conditions étudiées, et pour chacune des concentrations en zinc dans l'eau implémentée, la concentration en zinc chute à 0 µg/L dès 6 m de distance de la source de pollution.

<sup>32</sup> Il est important de noter que la concentration de 220 µg/L a été modélisée au départ de la concentration maximale dans le sol mesurée dans la couche de sol située entre la couche de cendre et le toit de la zone saturée (« nappe »).

Ce rapide calcul de dispersion démontre que la qualité de l'eau souterraine à hauteur de l'Attert ne pourrait être compromise en 100 ans par ce niveau de concentration en zinc dans l'eau<sup>33</sup>.

De plus :

- ce calcul ne tient pas encore compte de la dilution du zinc arrivant dans le cours d'eau de l'Attert ;
- la valeur du coefficient de partage sol/eau retenue dans le calcul ( $K_d = 3489$  L/kg) pourrait surestimer la vitesse de transport du zinc (partant de la concentration moyenne en zinc dans l'eau des piézomètres FP1 et FP6 de l'étude de Luxcontrol et des concentrations en zinc dans la zone saturée du sol mesurées à hauteur des points de prélèvements A7 et B7, hors influence de la couche de cendres, la valeur de  $K_d$  qui s'établit est de 70 588 L/kg, soit de 20 fois supérieure).

En conclusion, les résultats de la modélisation consolident l'hypothèse d'une absence de risque significatif tant pour les eaux souterraines que de surface (cours d'eau de l'Attert).

#### **7.4 Risques pour les écosystèmes**

Tel que défini dans les objectifs spécifiques de cette étude (cf. §2), l'évaluation préliminaire des risques écotoxicologiques a été entreprise en trois étapes :

- l'établissement d'un Modèle Conceptuel de Site (MCS) préliminaire sur base des observations de terrain ;
- l'établissement - à partir des concentrations en polluant dans le sol - des Fractions Potentiellement Affectées (FPA) des espèces (microorganismes, végétation terrestre et invertébrés) associées aux différents métaux lourds (zinc, cuivre et cadmium) considérés individuellement ;
- l'établissement de la FPA combinant les effets de la présence de différents polluants (si pertinent au terme de l'étape précédente) ;
- et enfin, le calcul des indices de risques pour les organismes trophiques supérieures : oiseaux et mammifères, exploitant notamment les valeurs des concentrations mesurées dans les végétaux et les lombrics.

##### **7.4.1 Modèle Conceptuel de Site préliminaire**

Pour rappel, le MCS décrit la situation relative à la pollution du sol et fournit une représentation des liens entre celle-ci, les propriétés physico-chimiques des polluants, les voies de transfert/d'exposition (telles que le contact direct, l'inhalation, l'ingestion de sol, l'ingestion d'eau, l'ingestion de plantes, l'ingestion d'invertébrés du sol et l'ingestion de petits vertébrés (pour les prédateurs)) et les impacts potentiels sur les différentes cibles/récepteurs écologiques présents.

Les principaux maillons trophiques ont ainsi été définis selon les recommandations du Guide de Référence pour l'Etude de Risques utilisé en Wallonie (Belgique) ainsi que leurs interactions avec leur milieu.

Le MCS tient compte des sources de pollution caractérisées par leurs concentrations (cf. **Tableau 8**) ainsi que de l'ensemble des voies de transfert pertinentes entre ces sources et les maillons trophiques déterminés. Le détail des chaînes sources-voies de transfert-cibles est repris dans les paragraphes suivants.

---

<sup>33</sup> A titre indicatif, compte tenu du facteur de retard important (résultant lui-même d'un coefficient de partage élevé), il faudrait de l'ordre de 15 000 ans pour que les concentrations en zinc atteignent l'eau souterraine à hauteur du cours d'eau de l'Attert.

#### 7.4.1.1 Sources de pollution et concentrations représentatives

Ont été considérés comme sources de pollution pertinentes, les mêmes polluants que pour la santé humaine à savoir :

- le zinc ;
- le cadmium ;
- et le cuivre.

Les risques ont été évalués pour ces polluants au départ des médianes et des percentiles-90 de leurs concentrations respectives (cf. **Tableau 8**) et pour chacune des approches (réaliste *versus* conservatoire) telles qu'établies *supra* (cf. §6).

#### 7.4.1.2 Cibles ou récepteurs écologiques

Dans le cadre de l'évaluation préliminaire des risques écotoxicologiques, des chaînes alimentaires simplifiées, mais néanmoins représentatives du milieu forestier ont été établies.

Ces chaînes sont représentées par des cibles (ou récepteurs écologiques) susceptibles d'être affecté(e)s par les pollutions en place :

- les microorganismes du sol (décomposeurs);
- les invertébrés du sol (consommateurs primaires et décomposeurs);
- la végétation terrestre (producteur primaire) ;
- le mammifère (consommateur secondaire) ;
- et enfin, l'oiseau (consommateur secondaire).

Selon nos hypothèses de travail pour le calcul des indices de risques, nous avons plus particulièrement considéré :

- deux mammifères : le cerf élaphe (*Cervus elaphus*) en tant qu'herbivore consommant principalement la partie foliaire de la végétation terrestre et le campagnol souterrain (*Microtus subterraneus*), herbivore également, mais ingérant quant à lui la partie racinaire des plantes ;
- un oiseau : le pinson des arbres (*Fringilla coelebs*), abondamment observé dans la forêt étudiée et consommant quant à lui majoritairement des invertébrés.

#### 7.4.1.3 Voies de transfert /d'exposition

Les voies de transfert ou les voies d'exposition modélisées dans cette étude entre les sources de pollution et les cibles décrites au point précédent sont :

- les voies d'exposition directes telles que le contact direct entre chaque récepteur et la source de pollution et l'ingestion de sol ; pour la végétation, l'absorption racinaire a été considérée en plus du contact direct ;
- les voies d'exposition indirectes constituées par les relations de prédation/alimentation.

Ces relations sont plus particulièrement développées dans le paragraphe 7.4.4 pour le calcul des doses d'exposition de l'oiseau et des mammifères étudiés.

#### 7.4.2 Etablissement des « Fractions Potentiellement Affectées » (FPA) (vision mono polluant) et interprétation

Le principe du calcul des Fraction Potentiellement Affectée (FPA) des espèces repose sur le principe que des résultats de tests d'écotoxicité (exemple : NOEC<sup>34</sup>) réalisés individuellement sur une espèce ou un organisme (en se limitant aux groupes taxonomiques inférieurs) peuvent être regroupés et interprétés comme un ensemble statistique. Cette interprétation statistique permet de quantifier

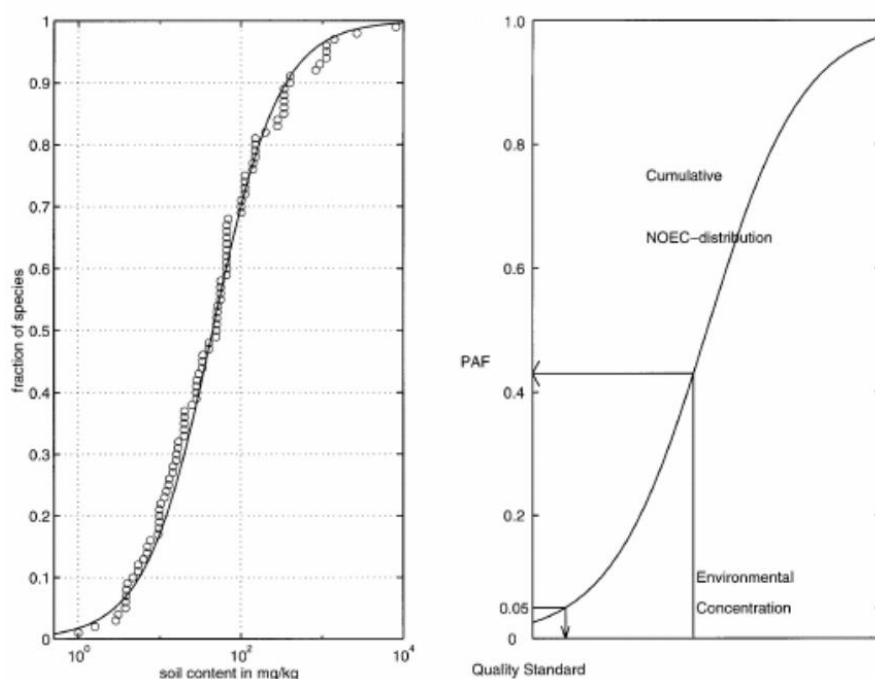
<sup>34</sup> No Observed Effective Concentration ou Concentration sans effet observable est la concentration maximale en un polluant à laquelle aucun effet significatif n'est observé sur l'organisme étudié au cours du test d'écotoxicité.



globalement le stress associé à une pollution. La représentation graphique de cette interprétation statistique est une courbe de Gauss, appelée « *Species Sensitive Distribution (SSD)* ». Elle est plus communément représentée par sa fonction de répartition cumulée et forme une courbe en S pour laquelle l'axe des abscisses représente la concentration en polluant dans le sol et l'axe des ordonnées représente le pourcentage d'espèces concernées par la concentration.

La FPA (exprimée en %) est la proportion d'une population d'organismes qui est exposée à une concentration en polluant dépassant leur NOEC et donc potentiellement affectée au regard de cette concentration mesurée dans le sol étudié (le principe d'interprétation est repris à la **Figure 22**).

La Fraction Potentiellement Affectée (FPA) a été établie pour chaque polluant pour les microorganismes du sol, les invertébrés et la végétation terrestre sur base des concentrations représentatives retenues pour chacune des approches de la couche de cendres (conservatoire et réaliste (cf. §6)). Cette interprétation (FPA) a pu être établie au départ de données écotoxicologiques (NOEC) collectées à partir de bases de données publiques<sup>35</sup> pour ces trois récepteurs et chaque polluant.



**Figure 22:** Représentation graphique de la Fraction Potentiellement Affectée (FPA ou PAF) (axe des Y) au regard de la concentration en polluant dans le sol (axe des X) (Klepper & van de Meent, 1997<sup>36</sup>).

Les résultats sont présentés aux **Tableau 14**, **Tableau 15** et **Tableau 16** respectivement pour le zinc, le cadmium et le cuivre.

**Tableau 14 :** Impact du zinc sur la végétation terrestre, les invertébrés du sol et les microorganismes, exprimé par la Fraction Potentiellement Affectée (en %).

<b>Fractions potentiellement affectées - Zinc</b>
---

<sup>35</sup> EPA-Ecotox database et PNEC Calculator (Arche Consulting).

<sup>36</sup> Klepper, O. and van de Meent D. (1997) Mapping the Potentially Affected Fraction (PAF) of species as an indicator of generic toxic stress. RIVM Report no. 607504001.

<b>Fractions potentiellement affectées - Zinc</b>		
<b><i>Approche conservatoire (N = 33)</i></b>	<b>FPA (%)</b>	<b>FPA (%)</b>
Concentrations représentatives dans la couche de cendres [mg/kg MS]	22400 (P-90)	2700 (Médiane)
<b>Végétation terrestre</b>	<b>100.0%</b>	<b>91.0%</b>
<b>Invertébrés</b>	<b>100.0%</b>	<b>82.3%</b>
<b>Microorganismes</b>	<b>99.9%</b>	<b>80.3%</b>
<b>Fractions potentiellement affectées - Zinc</b>		
<b><i>Approche réaliste (N = 18)</i></b>	<b>FPA (%)</b>	<b>FPA (%)</b>
Concentrations représentatives dans la couche de cendres [mg/kg MS]	24900 (P-90)	12500 (Médiane)
<b>Végétation terrestre</b>	<b>100.0%</b>	<b>99.9%</b>
<b>Invertébrés</b>	<b>100.0%</b>	<b>99.9%</b>
<b>Microorganismes</b>	<b>99.9%</b>	<b>99.2%</b>

Tableau 15 : Impact du cadmium sur la végétation terrestre, les invertébrés du sol et les microorganismes, exprimé par la Fraction Potentiellement Affectée (en %).

<b>Fractions potentiellement affectées - Cadmium</b>		
<b><i>Approche conservatoire (N = 33)</i></b>	<b>FPA (%)</b>	<b>FPA (%)</b>
Concentrations représentatives dans la couche de cendres [mg/kg MS]	1.6 (P-90)	0.35 (Médiane)
<b>Végétation terrestre</b>	<b>1.1%</b>	<b>0%</b>
<b>Invertébrés</b>	<b>0.1%</b>	<b>0%</b>
<b>Microorganismes</b>	<b>0.2%</b>	<b>0%</b>
<b>Fractions potentiellement affectées - Cadmium</b>		
<b><i>Approche réaliste (N = 18)</i></b>	<b>FPA (%)</b>	<b>FPA (%)</b>
Concentrations représentatives dans la couche de cendres [mg/kg MS]	2.47 (P-90)	0.99 (Médiane)
<b>Végétation terrestre</b>	<b>3.4%</b>	<b>0.3%</b>
<b>Invertébrés</b>	<b>4.2%</b>	<b>0.6%</b>
<b>Microorganismes</b>	<b>4.3%</b>	<b>0.8%</b>

Tableau 16 : Impact du cuivre sur la végétation terrestre, les invertébrés du sol et les microorganismes, exprimé par la Fraction Potentiellement Affectée (en %).

<b>Fractions potentiellement affectées - Cuivre</b>		
<b><i>Approche conservatoire (N = 33)</i></b>	<b>FPA (%)</b>	<b>FPA (%)</b>
Concentrations représentatives dans la couche de cendres [mg/kg MS]	1076 (P-90)	110 (Médiane)
<b>Végétation terrestre</b>	<b>64.6%</b>	<b>0.5%</b>
<b>Invertébrés</b>	<b>50.3%</b>	<b>1.9%</b>
<b>Microorganismes</b>	<b>66.4%</b>	<b>5.9%</b>
<b>Fractions potentiellement affectées - Cuivre</b>		
<b><i>Approche réaliste (N = 18)</i></b>	<b>FPA (%)</b>	<b>FPA (%)</b>
Concentrations représentatives	1320	350

[mg/kg MS]	(P-90)	(Médiane)
<b>Végétation terrestre</b>	<b>74.1%</b>	<b>14.1%</b>
<b>Invertébrés</b>	<b>57.9%</b>	<b>15.4%</b>
<b>Microorganismes</b>	<b>72.8%</b>	<b>29.1%</b>

Ces résultats montrent :

- que les concentrations actuellement mesurées en **zinc** dans la couche de cendres (aussi bien pour l'approche réaliste que conservatoire) peuvent affecter l'ensemble des populations de microorganismes du sol (processus microbiens), des invertébrés mais également la végétation terrestre. En effet, pour la majorité d'entre eux (entre 80 et 100 %), la concentration représentative dans le sol est supérieure à leur NOEC ;
- en ce qui concerne le **cuivre**, la fraction d'organismes potentiellement affectée est également relativement importante avec un pourcentage moyen d'environ 60 % pour les concentrations représentatives les plus importantes (p-90) (aussi bien pour l'approche réaliste que conservatoire) ;
- par contre, les concentrations présentes en **cadmium** n'affectent que très peu les trois niveaux trophiques étudiés (aussi bien pour l'approche conservatoire que réaliste).

En ce qui concerne les impacts des résidus de pneus et de cendres sur le terrain, une étude datant de 2009 sur les effets des particules de pneus sur l'environnement<sup>37</sup> avait déjà rapporté que les concentrations en zinc mesurées sur les fractions inférieures à 2 millimètres peuvent significativement réduire la croissance des plantes indiquant un effet phytotoxique du zinc. Les observations de terrain vont dans le sens de ces résultats notamment pour les mercuriales mais également pour les ficaires observées sur place. En effet, pour ces dernières, alors que leur population était représentée par de nombreux individus au Sud de la limite d'échantillonnage de la ligne « G », c'est-à-dire « hors zone d'influence de la couche de cendres », au-delà de cette limite et plus au Nord (au pied du talus), nous n'avons plus observé de spécimen de cette espèce. La présence de la couche de cendres à cet endroit y est probablement responsable en partie mais il est tout de même important de remarquer également qu'à cette hauteur, les conditions pour le développement de ces plantes y sont aussi moins favorables (milieu moins humide par exemple car plus en pente).

Pour les microorganismes, on ne dispose pas d'indication à ce stade permettant de consolider le résultat théorique (FPA pour les microorganismes compris entre 80 et 100 % selon les approches).

En ce qui concerne les invertébrés et plus particulièrement les vers de terre, leur présence a été notée notamment à hauteur du point D.0 (entre 0 et 20 cm de profondeur environ) où des cendres ainsi que des traces d'armatures de pneus ont été observées, ainsi qu'au point E.5 où des traces de cendres ont également été identifiées à la même profondeur. Ces observations de terrain témoignent que ces invertébrés sont capables de se développer en présence des cendres et ferrailles sur le terrain.

#### 7.4.3 Etude de l'effet de plusieurs polluants par l'établissement de la « combi-FPA »

Les tableaux 14 à 16 ci-dessus concernent les effets écotoxiques globaux attendus pour les polluants zinc, cadmium, et cuivre considérés individuellement. Partant de ces résultats, une estimation des effets écotoxiques globaux combinant les effets individuels des trois polluants est théoriquement possible (calcul d'une « combi-FPA »). Ce calcul – qui avait été prévu dans le cadre de l'étude – est cependant sans objet puisque les valeurs des coefficients FPA du zinc sont déjà proches des 100 %.

<sup>37</sup> Wik A. and Dave G. (2009) Occurrence and effects of tire wear particles in the environment – a critical review and an initial risk assessment. *Environmental Pollution* 157, pp. 1-11.

#### 7.4.4 Interprétation des valeurs de concentration mesurées dans les végétaux et lombrics et maillons trophiques supérieurs (oiseaux et mammifères)

De façon similaire à ce qui a été fait pour l'évaluation des risques pour la santé humaine, des indices de risques (IR) ont été calculés pour les maillons trophiques supérieurs à savoir les oiseaux et les mammifères.

Le calcul d'IR a été réalisé pour les zones impactée et non impactée par la couche de cendres (zone hors influence).

L'indice de risque (IR) se calcule en effectuant le rapport entre la dose à laquelle l'organisme est exposé et une dose de référence pour laquelle il est considéré que le risque est acceptable, appelée « Valeur de Référence Ecotoxicologique » (VRE)..

$$\text{Indice de Risques (IR)} = \frac{\text{Dose d'exposition (ou dose totale)}}{\text{Dose limite d'exposition acceptable (VRE)}}$$

Si l'IR est supérieure ou égal à 1, on estime qu'une part des organismes étudiés est susceptible d'encourir un risque et si au contraire il est inférieur à 1, le risque est jugé acceptable.

Le calcul des doses effectué pour chacune des trois espèces considérées, à savoir : le pinson des arbres, le cerf élaphe et le campagnol souterrain, repose sur l'équation simplifiée suivante :

$$\text{Dose totale (mg}_{\text{polluant}}/\text{kg}_{\text{poids corporel animal}}/\text{jour}) = (\text{Dose}_{\text{alim}} + \text{Dose}_{\text{ingestion sol}}) \times F_{\text{hab}}$$

Où :

Dose<sub>alim</sub> est la dose découlant de l'alimentation chez l'oiseau ou le mammifère (mg/(kg.jour)),

Dose<sub>ingestion sol</sub> est la dose découlant de l'ingestion de sol (mg/(kg.jour)),

F<sub>hab</sub> est le facteur d'ajustement pour l'aire d'alimentation (sans unité).

La dose liée à l'alimentation fait intervenir la concentration en polluant dans l'aliment ingéré, la proportion que chaque aliment occupe dans l'alimentation générale de l'organisme, le taux d'ingestion alimentaire de l'organisme, son métabolisme ainsi que son poids.

La dose liée à l'ingestion de sol fait quant à elle intervenir la concentration en polluant dans le sol, le taux d'ingestion de sol de l'organisme, son métabolisme ainsi que son poids.

Le facteur d'ajustement pour l'aire d'alimentation, F<sub>hab</sub>, est le rapport entre la surface de terrain étudiée (ici, celle occupée par la couche de cendres) et l'aire d'alimentation de l'organisme (oiseau/mammifère). Ce facteur d'ajustement permet de tenir compte dans le calcul de l'exposition du taux réel d'occupation du terrain pollué (ici, la surface occupée par la couche de cendres) pour l'organisme considéré et par rapport aux autres surfaces fréquentées, supposées non polluées. Les aires d'alimentation respectivement utilisées pour le campagnol souterrain, le cerf élaphe et le pinson des arbres ont été extraites du logiciel TerraSys<sup>TM 38</sup>. Les valeurs retenues pour la surface de la couche de cendres du F<sub>hab</sub> sont respectivement 220 m<sup>2</sup> pour l'approche réaliste et 315 m<sup>2</sup> pour l'approche conservatoire.

Etant donné la sensibilité écologique du terrain, ce sont des Valeurs de Référence Ecotoxicologique correspondant à une protection de 80 % des organismes étudiés (ici, oiseau et mammifère) qui ont été retenues. Ces valeurs ont été sélectionnées au sein d'un document de référence du Centre

<sup>38</sup> Logiciel professionnel d'évaluation des risques écotoxicologiques des terrains contaminés développé par Sanexen Inc.

d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec (CEAEQ)<sup>39</sup>. Ces VRE ont été ajustées pour les mammifères afin de tenir compte d'un taux de métabolisme différent d'une espèce à l'autre, la relation de cet ajustement est exprimée par l'équation suivante<sup>40</sup> :

$$Dose_{récepteur} = Dose_{expérimentale} \times \left[ \frac{Poids\ expérimental}{Poids\ récepteur} \right]^{0.25}$$

Où :

$Dose_{récepteur}$  est la dose pour l'oiseau ou le mammifère étudié (mg/(kg.jour)),

$Dose_{expérimentale}$  est la dose obtenue par le test écotoxicologique réalisé en laboratoire (mg/(kg.jour)),

Poids expérimental est le poids de l'animal ayant subi le test d'écotoxicité (kg),

Poids récepteur est du mammifère étudié (kg).

Pour procéder au calcul des doses, et plus particulièrement, au calcul de la dose par l'alimentation, les résultats de dosages des métaux au sein des lombrics et de la végétation terrestre (ficiaires) été utilisés. Les concentrations dans le sol utilisées pour le calcul de la dose par l'alimentation et pour l'ingestion de sol ont été fixées aux percentiles-90 des concentrations des échantillons définis comme appartenant à la couche de cendres (approches réaliste (N = 18) et conservatoire (N = 33)).

Les VRE (ajustées pour les mammifères), les résultats du calcul des doses totales (repreant l'alimentation et l'ingestion de sol) et les résultats d'IR sont repris dans les **Tableau 17** et **Tableau 18**.

**Tableau 17 : Valeurs de Référence Ecotoxicologiques (VRE) (mg/kg<sub>poids corporel animal/jour</sub>), doses totales d'exposition (mg/kg<sub>p.c animal/jour</sub>), et Indices de Risques (IR) (sans unité) calculés pour la zone impactée (*approche conservatoire*) et hors couche de cendres.**

Zone impactée - Approche conservatoire (N=33)				
Polluant	Cible	Dose totale mg/kg pc animal /jour	VRE mg/kg pc animal /jour	IR (Dose/VRE)
Zinc	Pinson des arbres	6.89E+00	1.31E+02	5.27E-02
	Cerf élaphe	4.48E-03	3.52E+01	1.27E-04
	Campagnol souterrain	6.86E+02	3.41E+02	<b>2.01E+00</b>
Cuivre	Pinson des arbres	1.84E-01	4.50E+00	4.09E-02
	Cerf élaphe	2.30E-04	3.35E+00	6.87E-05
	Campagnol souterrain	3.46E+01	3.24E+01	<b>1.07E+00</b>
Cadmium	Pinson des arbres	2.13E-02	2.10E+00	1.01E-02
	Cerf élaphe	6.70E-07	2.83E-01	2.36E-06
	Campagnol souterrain	1.19E-01	2.74E+00	4.36E-02
Hors couche de cendres (N = 32)				
Polluant	Cible	Dose totale mg/kg pc animal /jour	VRE mg/kg pc animal /jour	IR (Dose/VRE)
Zinc	Pinson des arbres	1.99E+00	1.31E+02	1.52E-02
	Cerf élaphe	2.97E-04	3.52E+01	8.42E-06
	Campagnol souterrain	2.79E+01	3.41E+02	8.19E-02

<sup>39</sup> Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 2012, Valeurs de référence pour les récepteurs terrestres, Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 28 pp.

<sup>40</sup> Equation d'ajustement reprise du CEAEQ, 2012.

<b>Cuivre</b>	Pinson des arbres	5.23E-02	4.50E+00	1.16E-02
	Cerf élaphe	4.13E-05	3.35E+00	1.23E-05
	Campagnol souterrain	3.41E+00	3.24E+01	1.05E-01
<b>Cadmium</b>	Pinson des arbres	1.11E-02	2.10E+00	5.28E-03
	Cerf élaphe	7.72E-07	2.83E-01	2.73E-06
	Campagnol souterrain	8.49E-02	2.74E+00	3.10E-02

**Tableau 18 : Valeurs de Référence Ecotoxicologiques (VRE) ( $\text{mg/kg}_{\text{poids corporel animal/jour}}$ ), doses totales d'exposition ( $\text{mg/kg}_{\text{p.c. animal/jour}}$ ), et Indices de Risques (IR) (sans unité) calculés pour la zone impactée (*approche réaliste*) et hors couche de cendres.**

<b>Zone impactée - Approche réaliste (N=18)</b>				
<b>Polluant</b>	<b>Cible</b>	<b>Dose totale <math>\text{mg/kg pc}</math> <math>\text{animal /jour}</math></b>	<b>VRE <math>\text{mg/kg pc}</math> <math>\text{animal /jour}</math></b>	<b>IR (Dose/VRE)</b>
<b>Zinc</b>	Pinson des arbres	5.01E+00	1.31E+02	3.83E-02
	Cerf élaphe	3.44E-03	3.52E+01	9.75E-05
	Campagnol souterrain	5.28E+02	3.41E+02	<b>1.55E+00</b>
<b>Cuivre</b>	Pinson des arbres	1.48E-01	4.50E+00	3.29E-02
	Cerf élaphe	1.90E-04	3.35E+00	5.69E-05
	Campagnol souterrain	2.90E+01	3.24E+01	8.96E-01
<b>Cadmium</b>	Pinson des arbres	1.49E-02	2.10E+00	7.11E-03
	Cerf élaphe	5.75E-07	2.83E-01	2.03E-06
	Campagnol souterrain	1.01E-01	2.74E+00	3.67E-02
<b>Hors couche de cendres (N = 47)</b>				
<b>Polluant</b>	<b>Cible</b>	<b>Dose totale <math>\text{mg/kg pc}</math> <math>\text{animal /jour}</math></b>	<b>VRE <math>\text{mg/kg pc}</math> <math>\text{animal /jour}</math></b>	<b>IR (Dose/VRE)</b>
<b>Zinc</b>	Pinson des arbres	1.46E+00	1.31E+02	1.12E-02
	Cerf élaphe	3.24E-04	3.52E+01	9.20E-06
	Campagnol souterrain	3.83E+01	3.41E+02	1.12E-01
<b>Cuivre</b>	Pinson des arbres	3.72E-02	4.50E+00	8.27E-03
	Cerf élaphe	2.99E-05	3.35E+00	8.93E-06
	Campagnol souterrain	2.55E+00	3.24E+01	7.88E-02
<b>Cadmium</b>	Pinson des arbres	7.74E-03	2.10E+00	3.69E-03
	Cerf élaphe	5.42E-07	2.83E-01	1.91E-06
	Campagnol souterrain	5.97E-02	2.74E+00	2.18E-02

Ces résultats montrent que tant pour l'approche réaliste que conservatoire de la couche de cendres, les concentrations en zinc, cuivre et cadmium n'engendrent pas de risque pour l'oiseau (tel que le pinson des arbres), ni le mammifère herbivore (tel que le cerf élaphe). Les IR calculés pour le campagnol souterrain reflètent quant à eux le fait que ces organismes sont les plus sensibles aux concentrations en zinc (et dans une moindre mesure en cuivre) présentes dans la couche de cendres (indices de risques supérieurs à 1).

Notons que sur le terrain, plusieurs spécimens de rongeurs ont été observés lors des échantillonnages de sol, ces observations permettent de relativiser de manière générale l'impact présumé d'après le calcul théorique des risques.

#### 7.4.5 *Prise en compte de la fraction biodisponible du en zinc*

Les résultats de la section 5.1.5 ont fait état de ce que seulement 10 à 15 % du zinc présent existerait sous des formes biodisponibles . Les Fractions Potentiellement Affectées (cf. §7.4.2) et les IR calculés pour les oiseaux et mammifères ont dès lors été réévalués en partant de l'hypothèse que les concentrations en zinc auxquelles pourraient effectivement être soumis ces organismes soient de l'ordre de 15 % des concentrations totales mesurées. Les résultats obtenus sous cette hypothèse et comparés aux premiers résultats des paragraphes précédents sont repris dans le **Tableau 19**. Les FPA et IR n'ont été recalculés que pour le zinc, pour la zone impactée par la couche de cendres (et selon la vision « réaliste » de celle-ci) :

**Tableau 19 : Tableau comparatif des Fractions Potentiellement Affectées (exprimées en %) et Indices de risques (sans unité) en fonction de la concentration totale (représentative de la couche de cendres) et de la fraction échangeable du zinc.**

	Fractions Potentiellement Affectées (%)	
<b>Cibles écologiques</b>	$C_{\text{total Zn (p-90)}} = 24\,900 \text{ mg/kg}$	$C_{\text{fraction échangeable Zn}} = 3735 \text{ mg/kg}$
<b>Végétation terrestre (FPA)</b>	100	96
<b>Invertébrés du sol (FPA)</b>	100	92
<b>Microorganismes du sol (FPA)</b>	99.9	89
	Indices de Risques (sans unité)	
<b>Cibles écologiques</b>	$C_{\text{total Zn (p-90)}} = 24\,900 \text{ mg/kg}$	$C_{\text{fraction échangeable Zn}} = 3735 \text{ mg/kg}$
<b>Pinson des arbres (IR)</b>	3.83E-02	2.53E-02
<b>Cerf élaphe (IR)</b>	9.75E-05	2.36E-05
<b>Campagnol souterrain (IR)</b>	<b>1.55E+00</b>	3.22E-01

Il ressort de ces résultats que la prise en compte des concentrations biodisponibles du zinc (plutôt que les concentrations totales) ne modifie pas fondamentalement les valeurs des FPA calculées pour les différents groupes d'organismes considérés. Ceci s'explique par la forte écotoxicité du zinc et les concentrations élevées en Zn qui sont présentes dans les cendres.

En revanche, l'exposition du campagnol souterrain et donc l'indice de risque en résultant sont nettement moindres ( $IR \approx 0,3$ ) : par référence aux concentrations biodisponibles du zinc (ce qui constitue l'approche la plus réaliste), le calcul théorique du risque pour le campagnol souterrain aboutit dès lors également à la conclusion (déjà formulée pour le pinson ou le cerf élaphe, par référence aux concentrations totales) de l'absence de risque significatif.

## 8. Intégration des résultats, conclusions générales et recommandations

Le présent rapport s'inscrit dans le contexte de la recherche de solutions pour définir les meilleures stratégies de gestion pour le site de la décharge « Est » de Bissen et plus particulièrement pour le dépôt de cendres retrouvé au pied de ce dépôt. Pour répondre à cet objectif, on a procédé successivement :

- à la redélimitation du volume de cendres au pied de la décharge d'une part et caractérisation détaillée de la distribution des concentrations en métaux lourds d'autre part,
- et sur cette base : à une étude préliminaire des risques envers la santé humaine, les eaux souterraines et l'écosystème d'autre part.

### **8.1 Délimitation de la volumétrie de la couche de cendres et caractérisation de la distribution spatiale des concentrations en polluants**

Afin de délimiter de façon plus précise l'étendue de la couche de cendres et caractériser la distribution des concentrations en métaux lourds, 65 échantillons de sol ont été prélevés en suivant un maillage plus ou moins régulier autour de l'emplacement présumé de la couche de cendres. Ces échantillons ont fait l'objet d'analyses en métaux lourds dont en zinc, polluant présent à des concentrations importantes et mis en évidence au cours des études précédentes. Les résultats de ces analyses ont été comparés aux valeurs guides de la législation allemande (oSW1 et oPW1) ainsi qu'aux Valeurs de Référence (VR), valeurs indicatives des concentrations de fond, récemment proposées dans le cadre de l'avant-projet de loi sur la protection des sols au Grand-Duché de Luxembourg (projet DECLAM).

A la lumière de ces comparaisons et des observations de terrain, il ressort que les concentrations les plus élevées identifiées en métaux lourds et plus particulièrement en zinc et en cuivre sont effectivement associées à la présence de cendres sur le terrain. On note en effet une problématique visible en zinc et en cuivre pour respectivement 50 et 30 % des échantillons analysés (comparaison aux VR). En outre, on observe des dépassements ponctuels des valeurs guides et/ou des VR pour le cadmium, l'arsenic, le chrome total et le nickel (en revanche, pour le mercure et le plomb<sup>41</sup> aucun dépassement significatif n'est constaté) à hauteur d'échantillons pour lesquels des traces de cendres (ou suspicion) avaient été relevées lors de l'échantillonnage de terrain (cf. Annexe 3).

A l'aide de ces résultats et d'une étude statistique des distributions des concentrations en zinc dans le sol, deux approches ont été définies pour la couche de cendres et utilisées dans le cadre de l'étude de risques :

- une approche dite « réaliste » s'attachant à être représentative de la couche de cendres *sensu stricto*. Selon cette approche, la couche de cendres s'étend en profondeur jusqu'à une moyenne de 40 cm<sup>42</sup> pour une surface approximative de 220 m<sup>2</sup> et d'un volume d'environ 133 m<sup>3</sup> ;
- une approche dite « conservatoire » où l'extension a été délimitée selon une vision précautionneuse incluant - en plus des échantillons associés à la couche de cendres *sensu stricto* - des échantillons dont les concentrations étaient significativement différentes des concentrations de fond luxembourgeoises et supposées résultantes de la présence de la couche de cendres. Selon cette approche, la couche de cendres (qui est plutôt à considérer ici comme le volume pollué) s'étend jusqu'à une profondeur de 80 cm, sur une surface de 315 m<sup>2</sup>, pour un volume approximatif de 212 m<sup>3</sup>.

<sup>41</sup> À l'exception d'un échantillon.

<sup>42</sup> Cette extension s'étend ponctuellement jusque 80 cm pour le zinc à hauteur des points C.1, C.2 et G.4 (ce constat est également fait pour le cuivre pour les points d'échantillonnage C.2 et G.4, ainsi qu'au point D.0 (60 cm)).



Cette distinction permet d'une part d'être précautionneux dans le cadre de l'évaluation des risques et, d'autre part, de fournir à l'Administration de l'Environnement et autres parties prenantes de l'étude l'ensemble des éléments utiles à la prise de décision en matière de gestion.

### **8.2 Résultats de l'étude de risques préliminaire**

Partant de la délimitation du volume et des concentrations en métaux lourds associées, une étude de risques pour la santé humaine, les eaux souterraines et l'écosystème a été réalisée.

**Les risques envers la santé humaine** associés aux concentrations en zinc, en cuivre et en cadmium ont été exclus pour tout adulte et enfant qui se promèneraient sur le terrain étudié au regard des doses d'expositions auxquelles ils pourraient être exposés pendant cette activité.

**L'étude des risques envers les eaux souterraines** a démontré que le zinc en place et sous les conditions environnementales actuelles ne subit pas de transport significatif (lessivage) à même de compromettre significativement la qualité de l'eau souterraine endéans un intervalle de temps réaliste (pas de menace pour l'eau souterraine ni pour l'eau de surface –l'Attert).

En ce qui concerne **le risque d'entraînement des cendres vers l'Attert lors d'inondations**, bien qu'il ne puisse être totalement exclu, il ne concernerait qu'une surface très limitée de sorte que la probabilité d'incidence pour la qualité des eaux et des sédiments de l'Attert est selon toute vraisemblance très faible.

Les résultats de **l'étude des risques pour l'écosystème** montrent que sous les concentrations actuellement mesurées en zinc et en cuivre, une ou plusieurs fonctions vitales des microorganismes, des invertébrés du sol et de la végétation terrestre sont susceptibles de subir un effet néfaste. Certaines observations de terrain concordent avec ces résultats pour ce qui concerne la végétation terrestre. En effet, les populations des différentes espèces observées (telles que les mercuriales et les ficaires fausse-renoncule) semblent sous influence de la présence de la couche de cendres à hauteur de celle-ci : leurs populations s'effacent à cet endroit laissant place notamment aux orties, espèce ubiquiste de moindre intérêt écologique alors qu'elles étaient relativement abondantes en périphérie et en amont de la problématique. Notons tout de même qu'une re-végétalisation importante du talus et du pied de celui-ci s'est opérée depuis l'incendie et qu'en périphérie, on observe une biodiversité notable de la flore. S'agissant par contre des maillons trophiques supérieurs, la modélisation des expositions qui a été réalisée pour les oiseaux (pinsons des arbres pris comme exemple) et les mammifères (cerf élaphe et campagnol souterrain) a conclu à l'absence de risque significatif. Les observations de terrain faites lors de la campagne d'échantillonnage vont – au moins pour le campagnol – aussi dans le sens de ce résultat.

### **8.3 Conclusions générales et recommandations techniques**

En conclusion le volume pollué évalué de façon conservatoire<sup>43</sup> serait de l'ordre de 220 m<sup>3</sup> et il occuperait une surface de l'ordre de 320 m<sup>2</sup> (3.2 ares).

La pollution peut être considérée comme sans risque pour la santé, pour l'eau de surface et l'eau souterraine. Son seul impact concernerait les organismes biologiques des niveaux trophiques inférieurs (microorganismes, invertébrés et plantes) directement associés aux volumes pollués : on peut considérer que la couche de cendres est selon toute vraisemblance un volume où l'activité

<sup>43</sup> Il faut néanmoins considérer qu'à flanc de talus des petites poches de cendres peuvent exister très localement et ne pas avoir été repérées lors de l'échantillonnage.

biologique est devenue très réduite en raison de la pression écotoxique des polluants présents et que les volumes de sols pollués situés directement sous la couche de cendre (ainsi que l'eau porale en équilibre avec le sol et/ou les cendres dans les zones où la nappe est proche de la surface) constituent des milieux également impactés sur le plan écotoxicologique.

La formulation de recommandations en matière de gestion doit prendre en compte, au regard des différentes mesures et techniques d'intervention proposées : d'une part les bénéfices pour l'environnement qui pourront être acquis mais aussi, d'autre part, les coûts et contraintes secondaires (nuisances et impacts écologiques) attendus.

A ce titre, partant du principe qu'il n'y aurait pas d'impact sur les maillons supérieurs de l'échelle trophique, le gain environnemental qu'il y aurait à assainir la zone se limiterait à regagner une surface saine sur le plan biologique. Comme cette surface ne représente que 0.07% de la surface totale de la zone Natura 2000 (LU0001014 – « Zones humides de Bissen et Fensterdall », d'une surface de 44.5 ha) ou, rapporté plutôt à la surface de l'unité « Kallekhaf » de la zone LU0001014 :  $\pm 0.1\%$ , le gain environnemental peut être considéré comme négligeable. Par ailleurs, pour ce qui concerne au moins la partie de la surface polluée située dans la plaine et qui est déjà recouverte de colluvions/alluvions ainsi que de végétation : il faut considérer que toute intervention qui viserait au retrait et à l'élimination de la couche de cendres ne pourrait s'effectuer que moyennant des moyens mécaniques. Comme l'intervention de ces moyens mécaniques - ne fut ce déjà que pour accéder à la zone - engendrerait des conséquences écologiques importantes, le bénéfice environnemental considéré globalement serait selon toute vraisemblance négatif.

Ce qui pourrait être effectué avec « un certain » bénéfice environnemental se limiterait dès lors à ce qui pourrait être engagé avec des moyens très simples, comme le retrait manuel (pelle de terrassier ou autres) des couches de cendres qui affleurent en surface au pied du talus et dans la partie inférieure du flanc de talus (le long des points C-E.0 jusqu'aux points C-D6 dans un axe Sud-Est le long de la ligne de délimitation du talus de la décharge, cf. Figure 19). Cette opération - si elle est engagée - devrait prévenir les impacts sur les biotopes en place. L'excavation (en moyenne jusque 40 cm de profondeur, sur une largeur d'approximativement 5.50 m à partir de la limite du talus de la décharge et sur une longueur d'environ 30 m) devrait être guidée par les observations visuelles. Elle pourra prendre en compte les données des log de forages de la présente étude (cf. **Annexe 3**) et plus particulièrement pour les zones des points D.0, C.1, C.2 et G.4 situés le long de la délimitation du pied du talus de la décharge. Nous évaluons en première analyse le coût d'une intervention de ce type à une fourchette allant de 10.000 à 30.000 € selon les filières pour l'évacuation des déchets, lesquelles resteraient à évaluer.

Rédaction du rapport : M. en Sc. C. Dehon  
Chargée de projet



Relecture et contrôle qualité : H. Halen  
Co-gestionnaire



Version 1.0	Date d'application : 07/08/2012	DOC_TRA_09 Rapport RISC
-------------	---------------------------------	-------------------------

## **ANNEXE 1 : Relevé topographique**

Coordonnées X, Y et Z (m) des points d'échantillonnage de la présente campagne ainsi que de la campagne de Luxcontrol (points M1 à FP4) :

	X	Y	Z
F0	70366.10	94662.31	232.02
E0	70364.24	94659.93	230.05
D0	70361.89	94654.33	228.26
C0	70358.58	94655.11	228.47
G0	70358.46	94648.88	228.01
A3	70358.94	94645.14	227.85
B3	70355.42	94641.33	227.93
G3	70360.64	94646.59	227.81
C3	70362.25	94649.07	227.97
D3	70365.99	94652.17	228.83
E2	70373.09	94650.70	230.72
D2	70369.60	94647.37	228.59
C2	70366.45	94644.64	227.78
G2	70363.81	94643.51	227.71
A2	70363.37	94639.93	227.68
B2	70358.37	94636.68	227.75
A1	70366.99	94636.71	227.41
G1	70368.76	94638.99	227.32
B1	70364.21	94630.74	227.49
C1	70368.31	94642.86	227.50
E4	70379.48	94644.27	229.87
D4	70377.32	94641.88	227.78
C4	70373.99	94637.54	227.18
G4	70373.42	94634.98	227.08
A4	70371.23	94633.23	227.17
B4	70369.41	94628.75	227.16
B5	70372.34	94625.72	226.97
A5	70374.85	94630.33	227.04
G5	70376.77	94632.40	226.96
C5	70379.52	94634.62	227.03
D5	70383.21	94638.15	228.34
E5	70384.98	94642.15	231.24
D6	70387.40	94637.23	228.41
C6	70382.81	94633.70	227.04
A6	70377.99	94628.42	226.87
B6	70376.27	94623.68	226.81
B7	70379.24	94619.63	226.80
A7	70383.19	94622.96	226.83
C7	70390.57	94628.33	226.75
C10	70390.67	94618.76	226.70
M1	70346.11	94658.67	229.50
M2	70370.34	94640.57	227.37
M3	70385.62	94627.59	226.78
M4	70404.00	94622.83	226.65
FP1	70352.93	94629.95	227.54
FP2	70380.71	94615.31	226.77
FP3	70407.18	94612.42	226.65
FP4	70430.93	94613.83	226.53

**ANNEXE 2 : Reportage photographique – échantillonnage des 28 et 29 avril 2015 – Bissen – Décharge « Est »**

Points de prélèvement en limite de la couche de cendres (mais non impactée par celle-ci) :

Photo 1 : A1 (0 – 40 cm)



Photo 2 : A2 (0 – 100 cm)





**Photo 3 : A3 (0 – 100 cm)**



Points de prélèvement au sein de la couche de cendres (au pied du talus) :

Photo 4 : C0 (0 – 15 cm)



Photos 5 et 6 : C2 (0-80 cm)



Photos 7 et 8 : C3 (0 – 18 cm):



Photo 9 : C4 (20 – 35 cm)



**Photo 10 : C5 (0 – 35 cm)**



Dépôt de pneus, résidus de ferrailles de pneus :

Photos 11 et 12 : pneus







Ferraille :

Photos 13, 14 et 15 : D0 : au sein de la couche de cendres (ici en limite du talus), présence de ferrailles de pneus





Photos 16 et 17 : E.0 (présence de ferrailles)



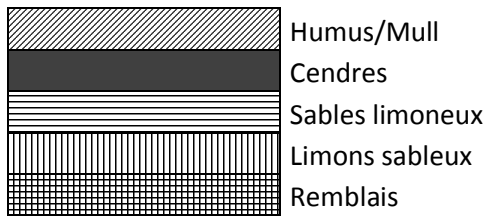
Photos 18 et 19 : prélèvement des ficaires en zone impactée



Version 1.0	Date d'application : 07/08/2012	DOC_TRA_09 Rapport RISC
-------------	---------------------------------	-------------------------

## **ANNEXE 3 : Description lithologique des forages**

**Légende :**



A.1				A.2				A.3				A.4				A.5								
Coordonnées (m)		X	Y	Z	Coordonnées (m)		X	Y	Z	Coordonnées (m)		X	Y	Z	Coordonnées (m)		X	Y	Z					
		70366.99	94636.71	227.41			70363.37	94639.93	227.68			70358.94	94645.14	227.85			70371.23	94633.23	227.17			70374.85	94630.33	227.04
Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description	
0			Sables limoneux	0			Sables limoneux	0			Limons	0			Sables limoneux Débris végétaux	0			Sables limoneux					
10	A.1.1 (0 - 20 cm)			10	A.2.1 (0 - 20 cm)			10	A.3.1 (0 - 20 cm)			10				10								
20			Sables limoneux	20			Sables limoneux	20			Limons argileux	20	A.4.1 (0 - 40 cm)		Niveau d'eau	20	A.5.1 (0 - 40 cm)		Niveau d'eau					
30			Niveau d'eau	30				30				30			Traces noirâtres	30								
40				40				40				40			Sables limoneux	40			Sables limoneux					
50				50				50				50				50								
60				60	A.2.2 (20 - 100 cm) :		Traces de charbon de bois	60	A.3.2 (20 - 100 cm)		Niveau d'eau	60	A.4.2 (40 - 80 cm)			60	A.5.2 (40 - 80 cm)							
70	A.1.2 (20 - 120 cm)			70				70				70				70								
80				80				80				80				80								
90				90				90				90				90								
100				100				100				100				100								
110																								
120																								



A.6				A.7				B.1				B.2				B.3			
Coordonnées (m)		X	Y	Z	Coordonnées (m)		X	Y	Z	Coordonnées (m)		X	Y	Z	Coordonnées (m)		X	Y	Z
Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description
0			Sables limoneux	0			Sables limoneux	0			Sables limoneux	0			Sables limoneux	0			Sables limoneux
10				10				10	B.1.1 (0 - 20 cm)			10	B.1.1 (0 - 20 cm)			10	B.3.1 (0 - 20 cm)		
20	A.6.1 (0 - 40 cm)			20			Sables limoneux	20			Sables limoneux	20			Sables limoneux	20			Sables limoneux Plus argileux
30				30	A.7.1 (20 - 40 cm)			30				30				30			
40				40			Sables limoneux	40				40				40			
50				50				50				50				50			
60	A.6.2 (40 - 80 cm)			60				60				60	B.2.2 (20 - 100 cm)			60	B.3.2 (20 - 100 cm)		
70				70				70				70				70			
80				80				80				80				80			
90				90				90				90				90			
100				100				100				100				100			

B.4				B.5				B.6				B.7				C.0				C.1																																																			
Coordonnées (m)				Coordonnées (m)				Coordonnées (m)				Coordonnées (m)				Coordonnées (m)				Coordonnées (m)																																																			
X				Y				Z				X				Y				Z				X				Y				Z																																							
70369.41				94628.75				227.16				70372.34				94625.72				226.97				70376.27				94623.68				226.81				70379.24				94619.63				226.8				70358.58				94655.11				228.47				70368.31				94642.86				227.5			
Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description																																				
0			Sables limoneux	0			Sables limoneux	0			Limons	0			Limons Traces de charbon de bois	0			Mull / Cendres	0			Sables limoneux	0			Sables limoneux	0			Sables limoneux	0			Sables limoneux																																				
10				10				10				10				10				10			C.0.1 (0 - 15 cm)	10			C.1.1 (0 - 20 cm)	10			C.1.1 (0 - 20 cm)	10			C.1.1 (0 - 20 cm)																																				
20			Sables limoneux	20	B.5.1 (0 - 40 cm)			20	B.6.1 (0 - 40 cm)			20	B.7.1 (0 - 40 cm)			20			Limons sableux	20				20			Sables limoneux	20			Sables limoneux	20			Sables limoneux																																				
30				30				30				30				30				30				30				30				30																																							
40	B.4.1 (20 - 40 cm)			40			Sables limoneux	40			Limons argileux	40			Limons argileux	40			C.0.2 (15 - 60 cm)	40				40				40				40																																							
50				50				50				50				50				50				50				50				50																																							
60				60	B.5.2 (40 - 80 cm)			60				60				60			Niveau d'eau	60				60				60				60			Niveau d'eau																																				
70				70				70				70				70				70				70				70				70																																							
80				80				80				80				80				80				80				80				80																																							
90				90				90				90				90				90				90				90				90																																							
100				100				100				100				100				100				100				100				100																																							

C.2				C.3				C.4				C.5				C.6			
Coordonnées (m)		X	Y	Z	Coordonnées (m)		X	Y	Z	Coordonnées (m)		X	Y	Z	Coordonnées (m)		X	Y	Z
70366.45		94644.64	227.78	70362.25		94649.07	227.97	70373.99		94637.54	227.18	70379.52		94634.62	227.03	70382.81		94633.7	227.04
Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description
0			Cendres	0			Cendres (+++)	0			Sables limoneux	0			Cendres	0			Cendres
10				10	C.3.1 (0 - 18 cm)			10	C.4.1 (0 - 20 cm)			10				10	C.6.1 (0 - 20 cm)		
20	C.2.1 (0 - 35 cm)			20			Sables limoneux/cendres	20			Cendres	20	C.5.1 (0 - 35 cm)			20			
30				30	C.3.2 (18 - 40 cm)			30	C.4.2 (20 - 35 cm)			30				30			
40			Cendres	40			Sables limoneux	40			Cendres	40				40			
50				50	C.3.3 (40 - 60 cm)			50	C.4.3 (35 - 60 cm)			50	C.5.2 (35 - 60 cm)			50			
60	C.2.2 (35 - 80 cm)		Niveau d'eau	60			Niveau d'eau	60				60				60			
70				70				70				70				70			
80				80				80				80				80			
90				90				90				90				90			
100				100				100				100				100			

C.7				C.10				D.0				D.0				D.2								
Coordonnées (m)		X	Y	Z	Coordonnées (m)		X	Y	Z	Coordonnées (m)		X	Y	Z	Coordonnées (m)		X	Y	Z					
Profondeur (cm)		Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)		Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)		Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)		Echantillon(s)	Profil	Description					
0				Sables limoneux/cendres	0				Limons Traces de charbon de bois	0				0 - 5 cm : Humus/cendres + armature pneus 5 - 22 cm : Remblais	0				0 - 8 cm : Humus					
10	C.7.1 (0 - 20 cm)				10					10				D.0.3 (0 - 22 cm)					10	D.2.1 (0 - 22 cm)				8 - 15 cm : Ferrailles
20					20	C.10.1 (0 - 40 cm)				20	D.0.1 (0 - 40 cm)									20				15 - 22 cm : Cendres
30					30					30				D.0.4 (22 - 35 cm)						30				22 - 50 cm : Sables limoneux
40					40					40										40				
50					50					50				D.0.5 (35 - 60 cm)						50				
60					60					60	D.0.2 (40 - 80 cm)									60				
70					70					70										70				
80					80					80										80				
90					90					90										90				

D.3				D.4				D.5				D.6				E.0			
Coordonnées (m)		X	Y	Z	Coordonnées (m)		X	Y	Z	Coordonnées (m)		X	Y	Z	Coordonnées (m)		X	Y	Z
Profondeur (cm)		Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)		Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)		Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)		Echantillon(s)	Profil	Description
0				Humus/cendres	0				Humus/cendres	0				0 - 15 cm : Humus/présence de pneus	0				Humus/cendres + armatures de pneus
10					10		D.4.1 (0 - 15 cm)			10					10				
20					20					20					20				
30					30					30					30				
40					40					40					40				
50					50					50					50				
D.3.1 (0 - 40 cm)					D.4.1 (0 - 15 cm)					D.5.1 (0 - 15 cm)					E.0.1 (0 - 15 cm)				
E.4				E.5				F.0				G.0				G.1			
Coordonnées (m)		X	Y	Z	Coordonnées (m)		X	Y	Z	Coordonnées (m)		X	Y	Z	Coordonnées (m)		X	Y	Z
Profondeur (cm)		Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)		Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)		Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)		Echantillon(s)	Profil	Description
0				0 - 15 cm : Humus	0				Limons sableux/cendres	0				0 - 18 cm : Limons sableux	0				0 - 25 cm : Sables limoneux/cendres
10					10					10					10				
20				15 - 20 cm : Cailloux	20					20				18 - 36 cm : Limons sableux	20				25 - 30 cm : Limons sableux
30					30					30					30				Limons sableux
40					40					40				36 - 52 cm : Sables limoneux	40				
50					50					50					50				
60					60					60					60				
G.1.1 (0 - 30 cm)					E.5.1 (0 - 20 cm)					F.0.1 (0 - 50 cm)					G.1.2 (30 - 60 cm)				

G.2				G.3				G.4				G.5							
Coordonnées (m)		X	Y	Z	Coordonnées (m)		X	Y	Z	Coordonnées (m)		X	Y	Z	Coordonnées (m)		X	Y	Z
		70363.81	94643.51	227.71			70360.64	94646.59	227.81			70373.42	94634.98	227.08			70376.77	94632.4	226.96
Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description	Profondeur (cm)	Echantillon(s)	Profil	Description				
0			Limons sableux/cendres	0			Limons sableux	0			Humus/cendres	0			Humus				
10	G.2.1 (0 - 18 cm)			10	G.3.1 (0 - 18 cm)			10	G.4.1 (0 - 20 cm)			10	G.5.1 (0 - 26 cm)		Niveau d'eau				
20			Cendres	20			Limons sableux	20			Cendres + armatures de pneus	20							
30	G.2.2 (18 - 36 cm)			30	G.3.2 (18 - 36 cm)			30	G.4.2 (25 - 40 cm)			30	G.5.2 (26 - 36 cm)		Humus/cendres				
40			Sables-limoneux	40			Sables limoneux/cailloux	40			Sable-limoneux	40			Cendres/Sable limoneux				
50	G.2.3 (36 - 72 cm)			50	G.3.3 (36 - 52 cm)			50				50	G.5.3 (36 - 72 cm)						
60				60				60	G.4.3 (40 - 80 cm)			60							
70				70				70				70							
80				80				80				80							



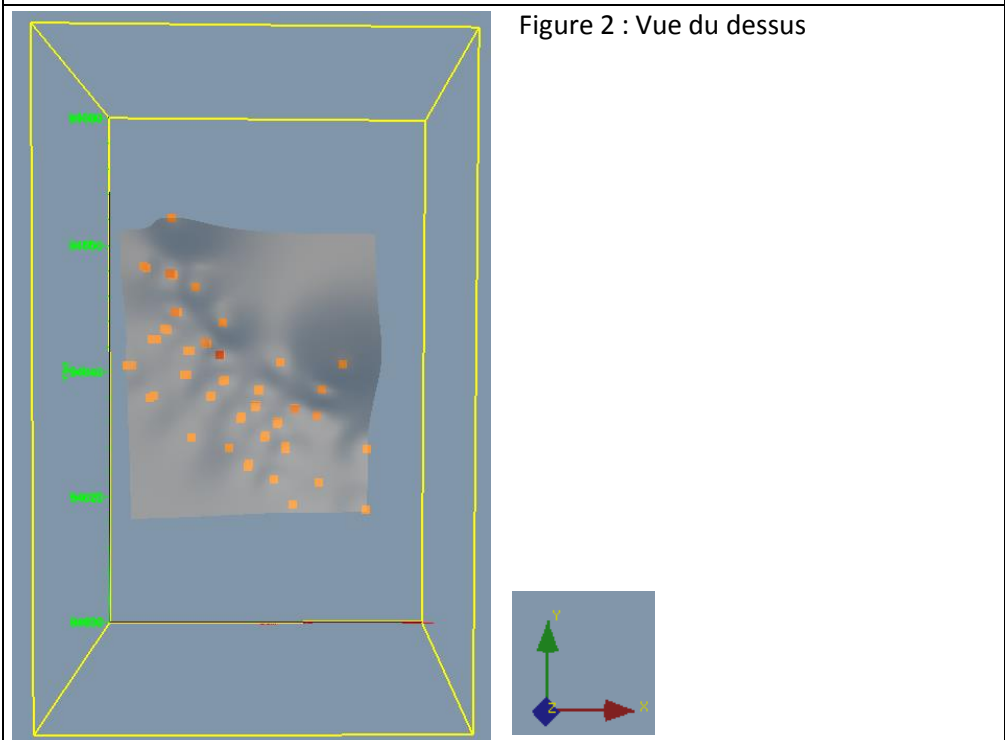
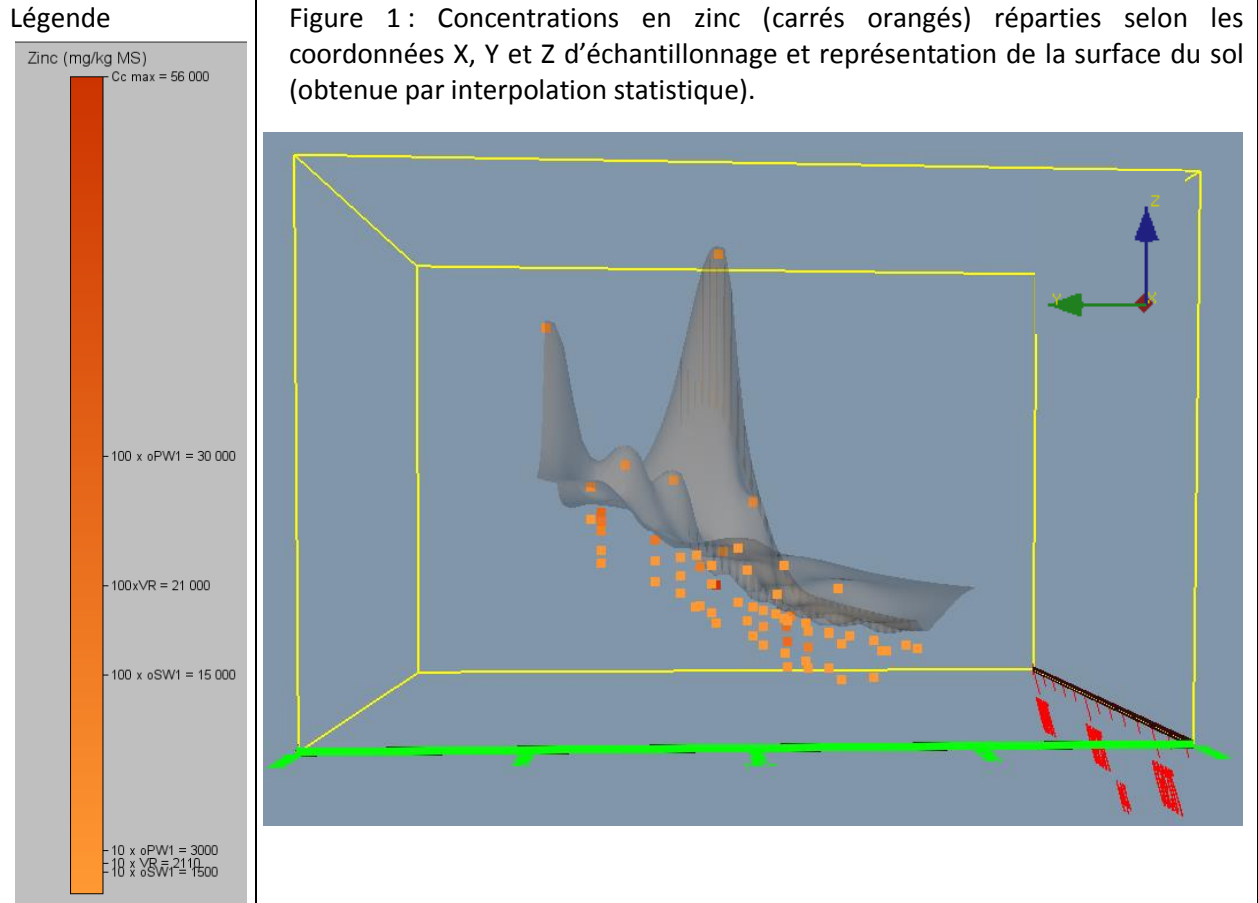
**ANNEXE 4 : Rapport du laboratoire ALcontrol : analyses de sol**



**ANNEXE 5 : Représentation en 3D des concentrations en zinc, cuivre et cadmium dans le sol (+ *Annexe électronique*)**

**Remarque importante :** les représentations ci-dessous proviennent des résultats d'interpolations statistiques réalisées à partir d'un nombre limité de données topographiques en conséquence, cela génère des aberrations graphiques inévitables (notamment pour la représentation du début de la pente du talus de la décharge).

**Figures 1 et 2 : Concentrations en zinc**



**Figures 3 et 4 : Concentrations en cuivre**

Légende :

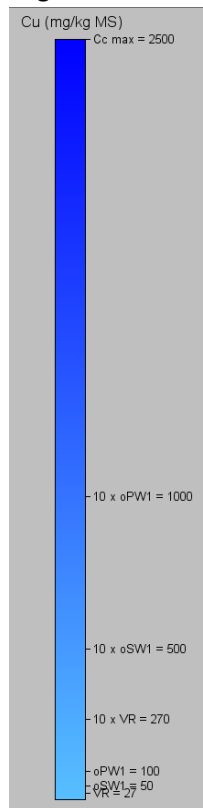


Figure 3 : Concentrations en cuivre (carrés bleus) réparties selon les coordonnées X, Y et Z d'échantillonnage et représentation de la surface du sol (obtenue par interpolation statistique)

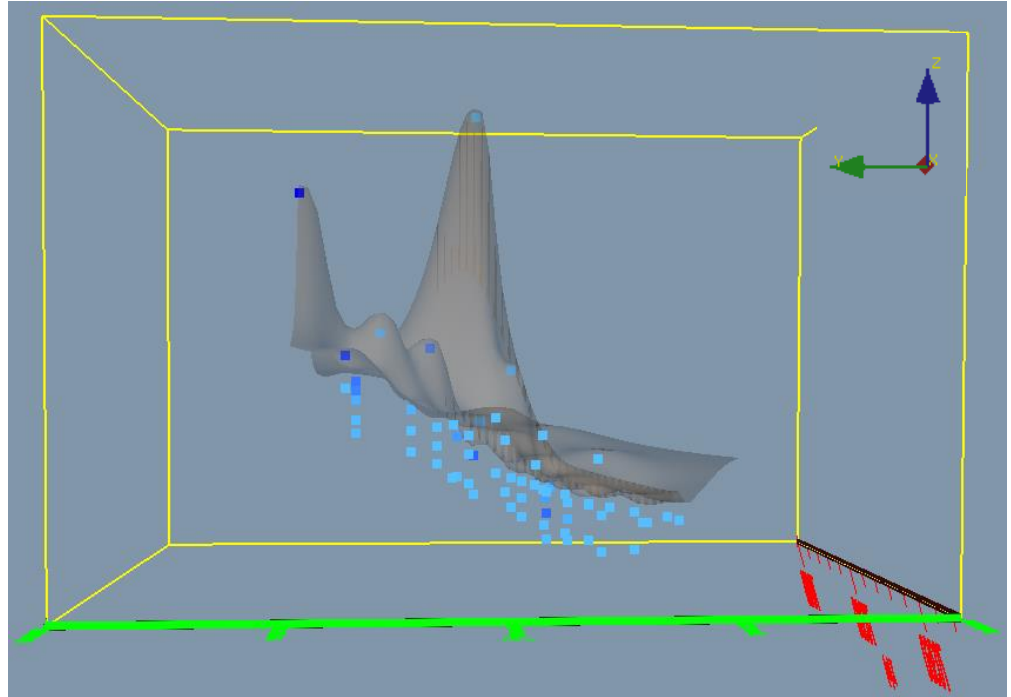
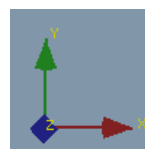
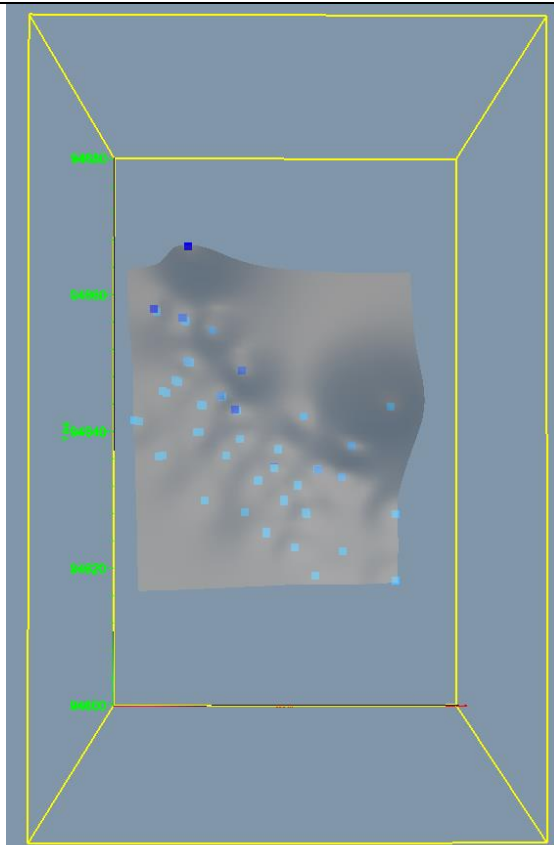


Figure 4 : Vue du dessus



**Figures 5 et 6 : Concentrations en cadmium**

Légende :

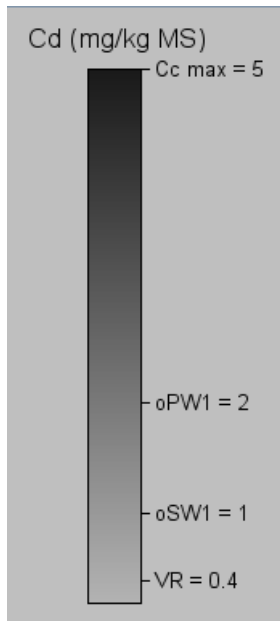


Figure 5 : Concentrations en cadmium (carrés gris) réparties selon les coordonnées X, Y et Z d'échantillonnage et représentation de la surface du sol (obtenue par interpolation statistique)

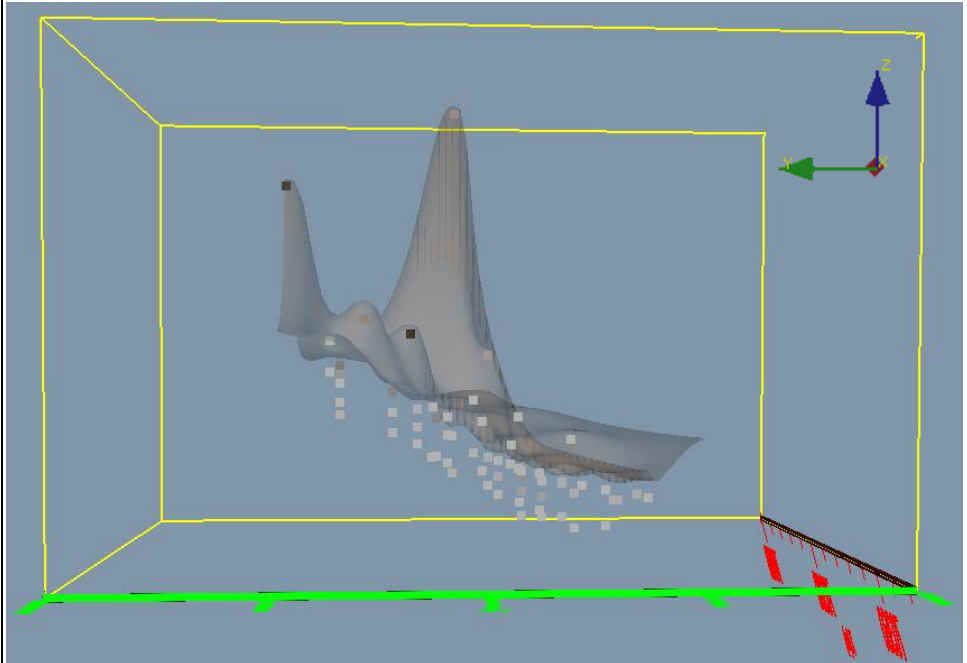
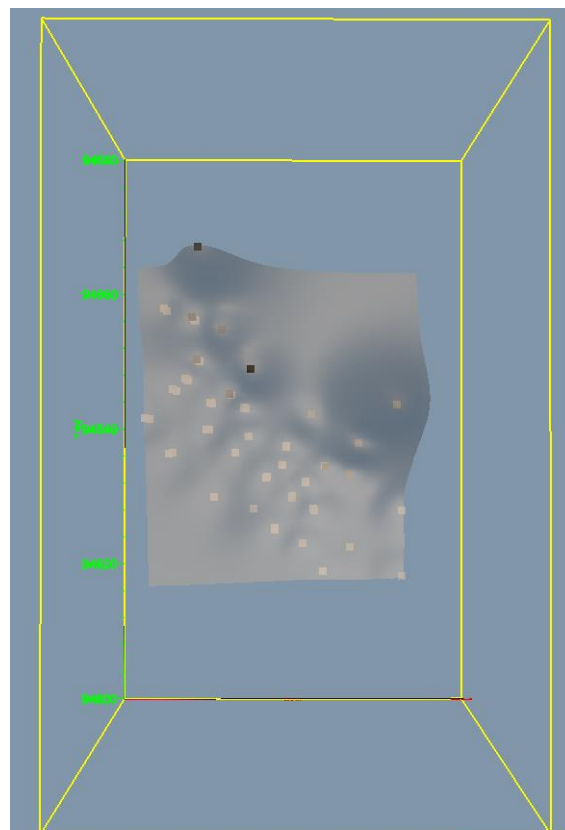


Figure 6 : Vue du dessus



**ANNEXE 6 : Echantillons définis comme appartenant à la couche de cendres *sensu stricto* (N = 18)**

Repère	X (m)	Y (m)	Z (m)	Prof_min (cm)	Prof_max (cm)	Echantillon	Cadmium (mg/kg MS)	Cuivre (mg/kg MS)	Zinc (mg/kg MS)
E0	70364.24	94659.93	230.05	0	15	E0.1	3.8	2500	10000
D0	70361.89	94654.33	228.26	0	40	D0.1	1.1	780	20000
D0	70361.89	94654.33	228.26	40	80	D0.2	0.29	110	2700
D0	70361.89	94654.33	228.26	0	22	D0.3	1.9	940	27000
D0	70361.89	94654.33	228.26	22	35	D0.4	<0.2	240	12000
C0	70358.58	94655.11	228.47	0	15	C0.1	<0.2	1600	9800
C3	70362.25	94649.07	227.97	0	18	C3.1	1.6	190	19000
D3	70365.99	94652.17	228.83	0	40	D3.1	1.6	290	9500
D2	70369.60	94647.37	228.59	0	22	D2.1	5	980	6600
C2	70366.45	94644.64	227.78	0	35	C2.1	1.6	500	16000
C1	70368.31	94642.86	227.50	0	20	C1.1	<0.2	1200	56000
D4	70377.32	94641.88	227.78	0	15	D4.1	0.81	170	2700
C4	70373.99	94637.54	227.18	20	35	C4.2	0.61	30	3800
G4	70373.42	94634.98	227.08	25	40	G4.2	0.87	1100	24000
G5	70376.77	94632.40	226.96	26	36	G5.2	0.85	190	14000
C5	70379.52	94634.62	227.03	0	35	C5.1	1.3	410	23000
D5	70383.21	94638.15	228.34	0	15	D5.1	0.64	230	7100
C6	70382.81	94633.70	227.04	0	20	C6.1	1.1	220	13000

**ANNEXE 7 : Représentation en 3D de la couche de cendres : approches réaliste et conservatoire (+ *annexe électronique*)**

**Remarque importante :** les représentations ci-dessous proviennent des résultats d'interpolations statistiques réalisées à partir d'un nombre limité de données topographiques en conséquence, cela génère des aberrations graphiques inévitables (notamment pour la représentation du début de la pente du talus de la décharge).

**Figures 1 et 2 :** Couche de cendres (en gris anthracite) définie selon une approche réaliste représentée par ses limites inférieure et supérieure sur l'axe Z

Figure 1 : Couche de cendres avec représentation de la surface du sol (en brun)

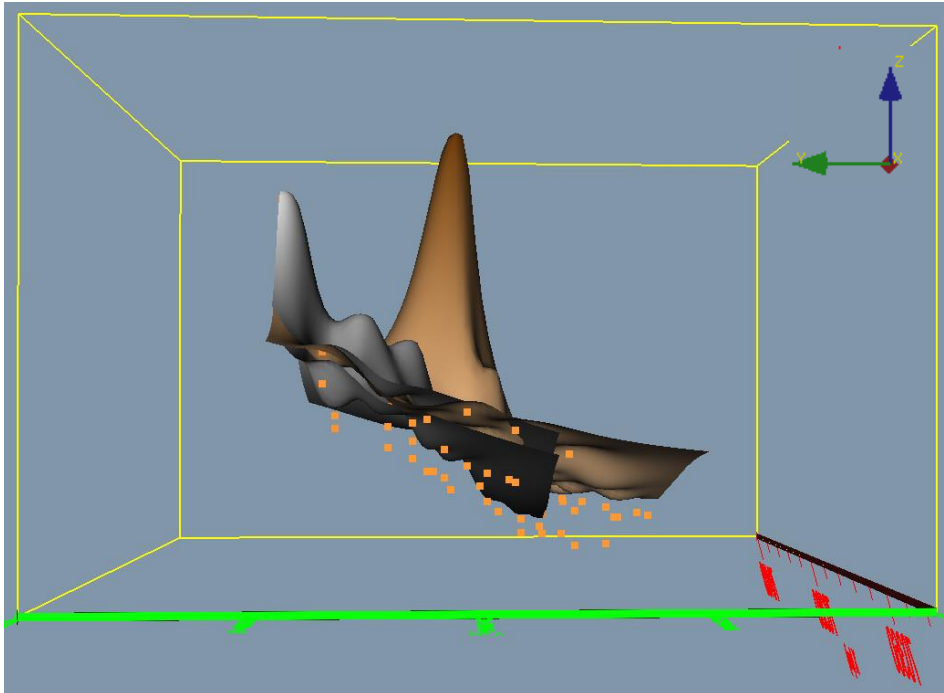
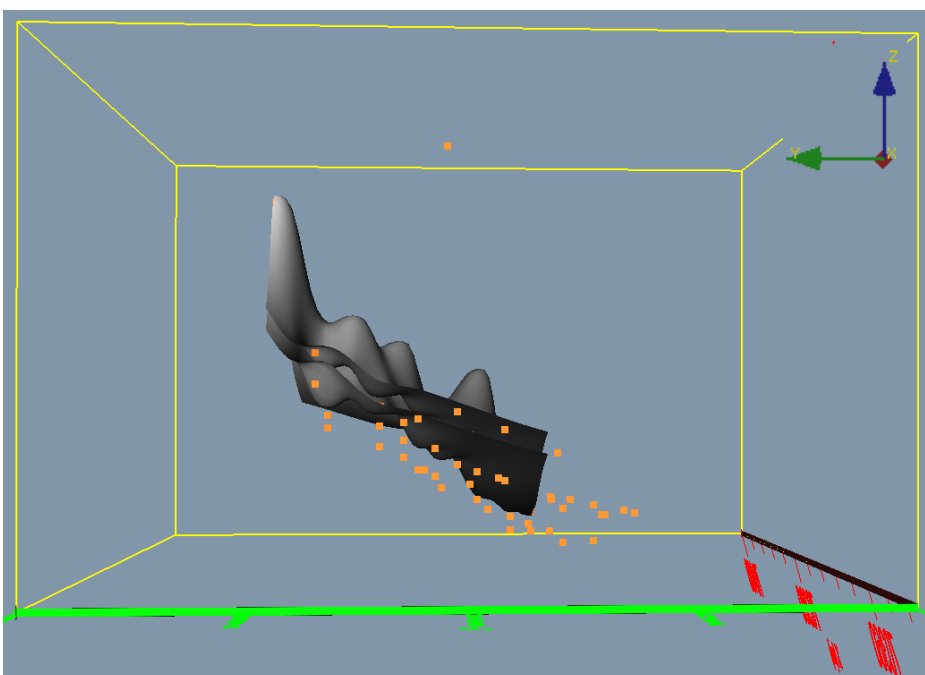


Figure 2 : Couche de cendres sans représentation de la surface du sol





**Figures 3 et 4 : Couche de cendres (en bleu) définie selon une approche conservatoire représentée par ses limites inférieure et supérieure sur l'axe Z**

Figure 3 : Couche de cendres avec représentation de la surface du sol (en brun)

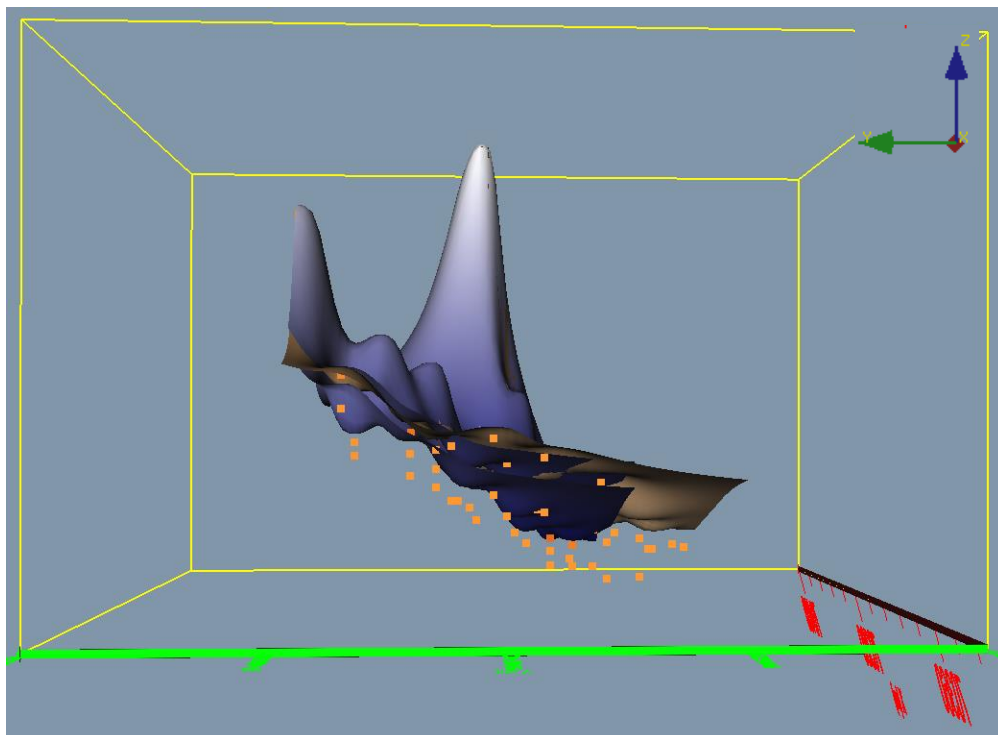
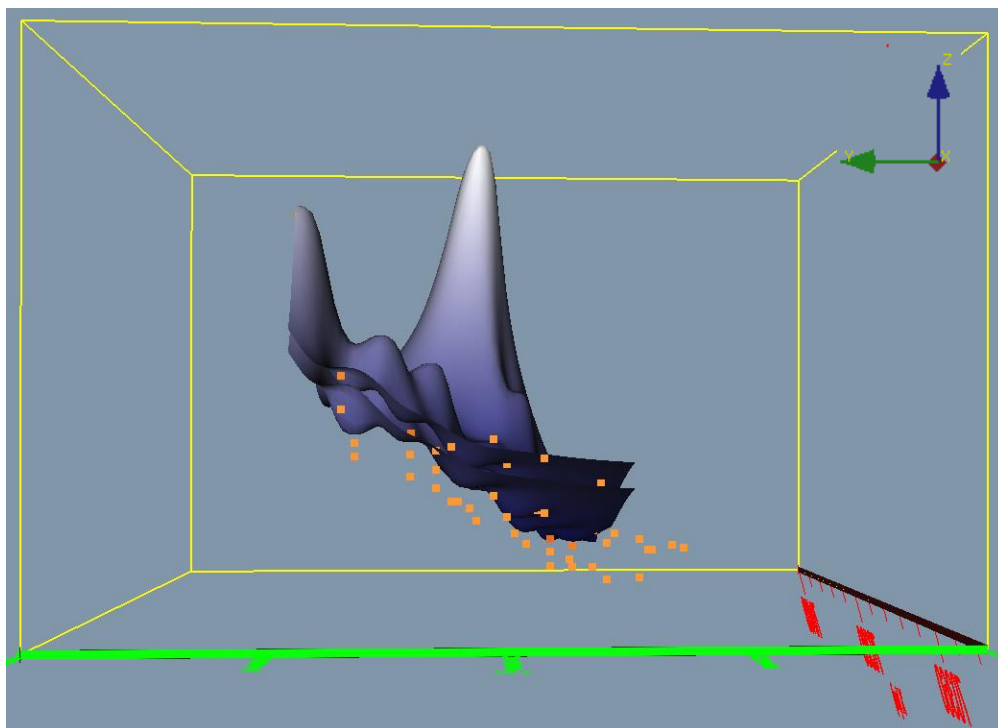


Figure 4 : Couche de cendres sans représentation de la surface du sol



**ANNEXE 8 : Propriétés physico-chimiques du cadmium, du cuivre et du zinc utilisées pour l'évaluation des risques santé humaine.**

Zinc : CAS-7440-66-6

Paramètre	Unité	Valeur	Références	Remarques
Masse moléculaire M	g/mole	65.39	Lide (2000)	
Coefficient de distribution sol/eau $K_d$	L/kg	=f(propriétés du sol)	Maes (2002) Maes & Halen (2006)	<b>Régression utilisée pour le calcul du <math>K_d</math> à partir des propriétés du sol :</b> $K_d = 10^{(-0,532 + 0,425 \text{ pHeau porale} + 0,771 \log A) - 0,152}$ (n= 79 ; $R^2 = 0,82$ ), avec $\text{pHeau porale} = (1.085 \text{ pHeau} - 0.709)$ ; A [%] la teneur en argile
Facteur de transfert sol/« racines » (poids sec) $BCF_{r,dw}$	$\left( \frac{\text{mg/kg}_{\text{racines dw}}}{\text{mg/kg}_{\text{sol}}} \right)$	0.11	Versluis & Otte (2001) Halen et al. (2004)	<b>BCF moyen</b> (moyenne géométrique) calculé par Versluijs & Otte (2001).
Facteur de transfert sol/« légumes » (poids sec) $BCF_{s,dw}$	$\left( \frac{\text{mg/kg}_{\text{légumes dw}}}{\text{mg/kg}_{\text{sol}}} \right)$	0.5	Versluijs & Otte (2001) Halen et al. (2004)	<b>BCF moyen</b> fixé à la moyenne des BCF pour les divers légumes-feuilles pondérée par les quantités consommées de chacun d'eux – données fournies par la FEDIS (Forum n°31, du 14/09/2001) concernant le marché des légumes frais achetés en Belgique en 2000 ; pour certains légumes (épinards, haricots et radis), les données du Ministère de la Santé de 1996 ont été utilisées.
Facteur de transfert sol/viande (poids frais) $BTF_{\text{viande}}$	$\left( \frac{\text{mg/kg}_{\text{viande, fw}}}{\text{mg/jour}} \right)$	1,34E-2	Calcul	Valeur calculée par RISC Human <sup>®</sup> en tenant compte du temps d'exposition du bétail, de son poids, de la quantité d'eau ingérée quotidiennement, de la fraction excrétée et de la fraction de graisse dans la viande (cf. Annexe B2-1.5)
Facteur de transfert sol/lait (poids frais) $BTF_{\text{lait}}$	$\left( \frac{\text{mg/L}_{\text{lait}}}{\text{mg/jour}} \right)$	1,66E-2	Calcul	Valeur calculée par RISC Human <sup>®</sup> en tenant compte du temps d'exposition du bétail, de son poids, de la quantité d'eau ingérée quotidiennement, de la fraction excrétée et de la fraction de graisse dans le lait (cf. Annexe B2-1.5)
Fraction absorbée par ingestion de sol $f_{a,ing}$	-	1		
Fraction absorbée par inhalation de sol $f_{a,inh}$	-	1		
Fraction excrétée par le bétail $f_{excr}$	-	1		
Taux d'absorption dermique $DAR_{\text{adulte}}$	1/h	0		
Taux d'absorption dermique $DAR_{\text{enfant}}$	1/h	0		

Cuivre : CAS-7440-50-8

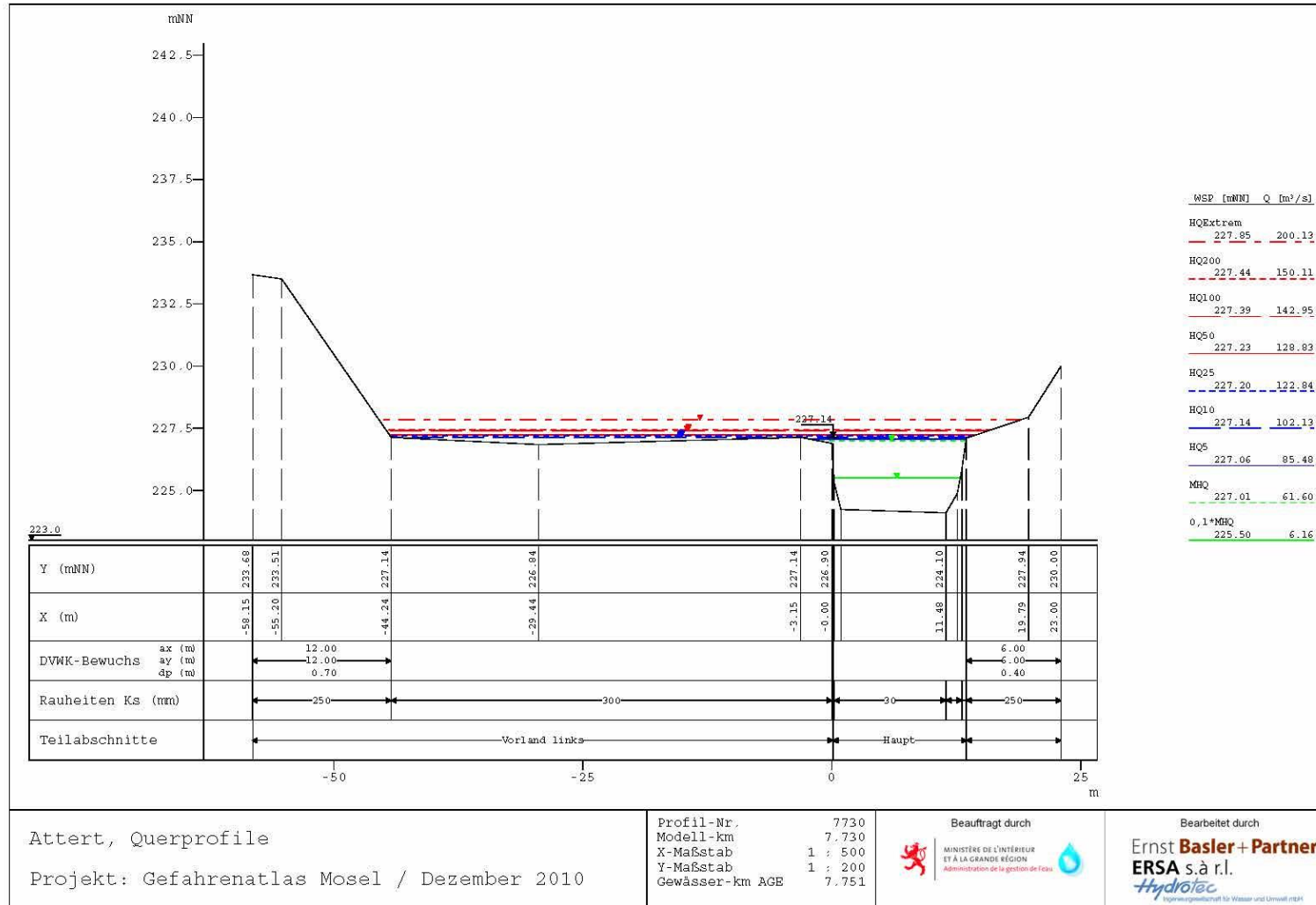
Paramètre	Unité	Valeur	Références	Remarques
Masse moléculaire M	g/mole	63.546	Lide (2000)	
Coefficient de distribution sol/eau $K_d$	L/kg	=f(propriétés du sol)	Maes (2002) Maes & Halen (2006)	<b>Régression utilisée pour le calcul du <math>K_d</math> à partir des propriétés du sol :</b> $K_d = 10^{(0,145 + 0,178 \text{ pHeau porale} + 0,651 \log \text{ Feo}) - 0,152}$ (n= 66 ; $R^2 = 0,69$ ), avec pHeau porale = (1.085 pHeau - 0.709) ; Feo [mmol/kg] contenu en fer extractible par $\text{NH}_4$ -oxalate
Facteur de transfert sol/« racines » (poids sec) $\text{BCF}_{r,dw}$	$\left( \frac{\text{mg/kg}_{\text{racines dw}}}{\text{mg/kg}_{\text{sol}}} \right)$	0.33	Versluijs & Otte (2001) Halen et al. (2004)	<b>BCF moyen</b> (moyenne géométrique) calculé par Versluijs & Otte (2001).
Facteur de transfert sol/« légumes » (poids sec) $\text{BCF}_{s,dw}$	$\left( \frac{\text{mg/kg}_{\text{légumes dw}}}{\text{mg/kg}_{\text{sol}}} \right)$	0.287	Versluijs & Otte (2001) Halen et al. (2004)	<b>BCF moyen</b> fixé à la moyenne des BCF pour les divers légumes-feuilles pondérée par les quantités consommées de chacun d'eux - données fournies par la FEDIS (Forum n°31, du 14/09/2001) concernant le marché des légumes frais achetés en Belgique en 2000 ; pour certains légumes (épinards, haricots et radis), les données du Ministère de la Santé de 1996 ont été utilisées.
Facteur de transfert sol/viande (poids frais) $\text{BTF}_{\text{viande}}$	$\left( \frac{\text{mg/kg}_{\text{viande, fw}}}{\text{mg/jour}} \right)$	1,34E-2	Calcul	Valeur calculée par RISC Human <sup>®</sup> en tenant compte du temps d'exposition du bétail, de son poids, de la quantité d'eau ingérée quotidiennement, de la fraction excrétée et de la fraction de graisse dans la viande (cf. Annexe B2-1.5)
Facteur de transfert sol/lait (poids frais) $\text{BTF}_{\text{lait}}$	$\left( \frac{\text{mg/L}_{\text{lait}}}{\text{mg/jour}} \right)$	1,66E-2	Calcul	Valeur calculée par RISC Human <sup>®</sup> en tenant compte du temps d'exposition du bétail, de son poids, de la quantité d'eau ingérée quotidiennement, de la fraction excrétée et de la fraction de graisse dans le lait (cf. Annexe B2-1.5)
Fraction absorbée par ingestion de sol $f_{a,ing}$	-	1		
Fraction absorbée par inhalation de sol $f_{a,inh}$	-	1		
Fraction excrétée par le bétail $f_{excr}$	-	1		
Taux d'absorption dermique $\text{DAR}_{\text{adulte}}$	1/h	0		
Taux d'absorption dermique $\text{DAR}_{\text{enfant}}$	1/h	0		

Cadmium : CAS-7440-43-9

Paramètre	Unité	Valeur	Références	Remarques
Masse moléculaire M	g/mole	112.411	Lide (2000)	
Coefficient de distribution sol/eau $K_d$	L/kg	=f(propriétés du sol)	Maes (2002) Maes & Halen (2006)	<b>Régression utilisée pour calculer le <math>K_d</math> à partir des propriétés du sol</b> $K_d = 10^{(-0,590 + 0,407 \text{ pH}_{\text{eau porale}} + 0,324 \log A + 0,455 \log \text{MO}) - 0,152}$ (n=101; $R^2 = 0,72$ ), avec $\text{pH}_{\text{eau porale}} = (1.085 \text{ pH}_{\text{eau}} - 0.709)$ ; A [%] la teneur en argile ; MO [%] la teneur en matière organique
Facteur de transfert sol/« racines » (poids sec) $\text{BCF}_{r,dw}$	$\left( \frac{\text{mg/kg}_{\text{racines,dw}}}{\text{mg/kg}_{\text{sol}}} \right)$	0.28	Versluijs & Otte (2001) Halen et al. (2004)	<b>BCF moyen</b> (moyenne géométrique) calculé par Versluijs & Otte (2001).
Facteur de transfert sol/« légumes » (poids sec) $\text{BCF}_{s,dw}$	$\left( \frac{\text{mg/kg}_{\text{légumes,dw}}}{\text{mg/kg}_{\text{sol}}} \right)$	1.206	Versluijs & Otte (2001) Halen et al. (2004)	<b>BCF moyen</b> fixé à la moyenne des BCF pour les divers légumes-feuilles pondérée par les quantités consommées de chacun d'eux - données fournies par la FEDIS (Forum n°31, du 14/09/2001) concernant le marché des légumes frais achetés en Belgique en 2000; pour certains légumes (épinards, haricots et radis), les données du Ministère de la Santé de 1996 ont été utilisées.
Facteur de transfert sol/viande (poids frais) $\text{BTF}_{\text{viande}}$	$\left( \frac{\text{mg/kg}_{\text{viande,fw}}}{\text{mg/jour}} \right)$	1,34E-2	Calcul	Valeur calculée par RISC Human <sup>®</sup> en tenant compte du temps d'exposition du bétail, de son poids, de la quantité d'eau ingérée quotidiennement, de la fraction excrétée et de la fraction de graisse dans la viande (cf. Annexe B2-1.5)
Facteur de transfert sol/lait (poids frais) $\text{BTF}_{\text{lait}}$	$\left( \frac{\text{mg/L}_{\text{lait}}}{\text{mg/jour}} \right)$	1,66E-2	Calcul	Valeur calculée par RISC Human <sup>®</sup> en tenant compte du temps d'exposition du bétail, de son poids, de la quantité d'eau ingérée quotidiennement, de la fraction excrétée et de la fraction de graisse dans le lait (cf. Annexe B2-1.5)
Fraction absorbée par ingestion de sol $f_{a,ing}$	-	1		
Fraction absorbée par inhalation de sol $f_{a,inh}$	-	1		
Fraction excrétée par le bétail $f_{excr}$	-	1		
Taux d'absorption dermique $\text{DAR}_{\text{adulte}}$	1/h	0		
Taux d'absorption dermique $\text{DAR}_{\text{enfant}}$	1/h	0		

**ANNEXE 9 : Profils en zone inondables (extrait du portail géographique luxembourgeois)**

Profil 1



Attert, Querprofile  
 Projekt: Gefahrenatlas Mosel / Dezember 2010

Profil-Nr. 7730  
 Modell-km 7.730  
 X-Maßstab 1 : 500  
 Y-Maßstab 1 : 200  
 Gewässer-km AGE 7.751

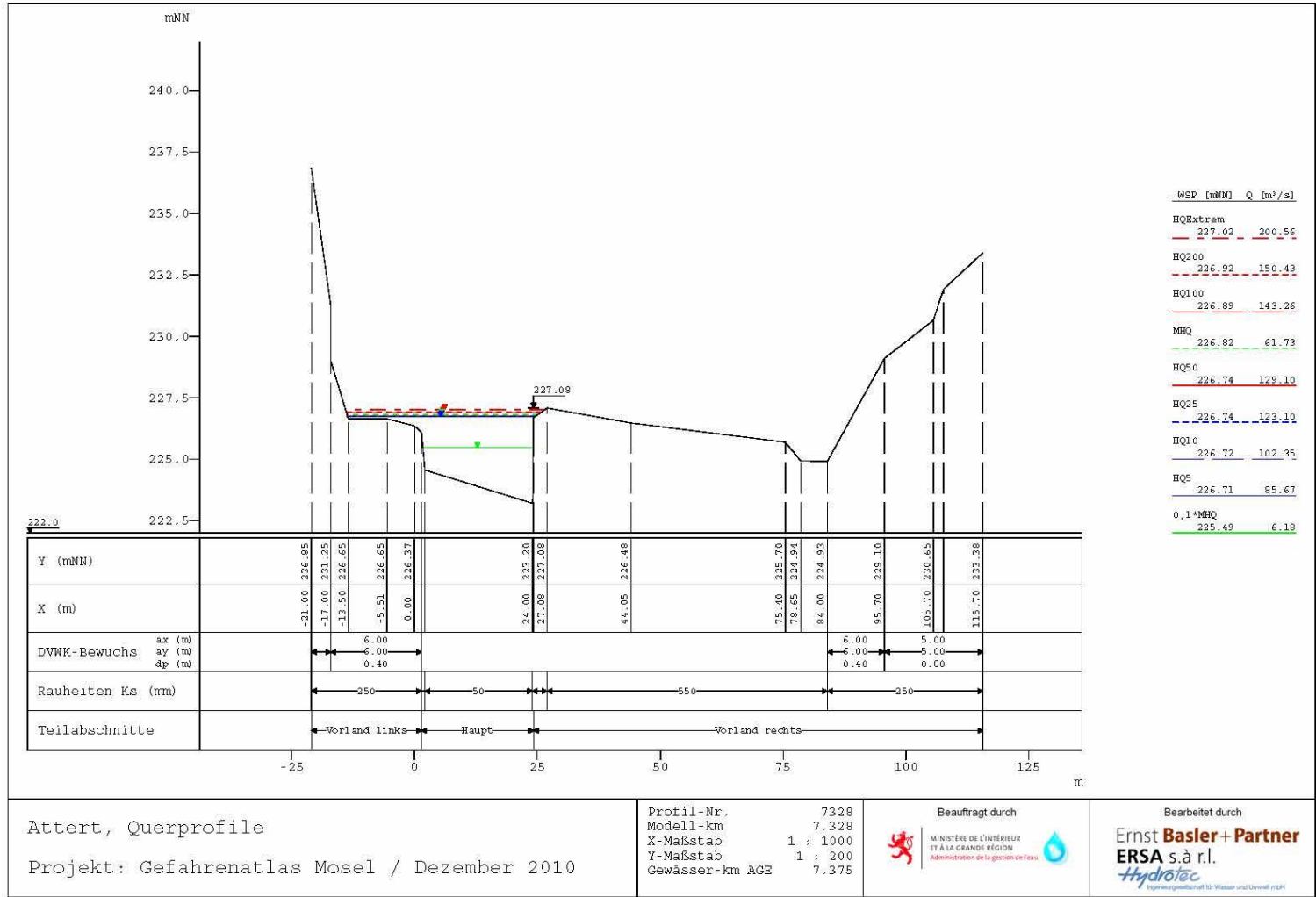


Beauftragt durch

Bearbeitet durch

Ernst Basler + Partner  
 ERSÄ s.à r.l.  
 Hydrotec

Profil 2



Atttert, Querprofile  
 Projekt: Gefahrenatlas Mosel / Dezember 2010

Profil-Nr. 7328  
 Modell-km 7.328  
 X-Maßstab 1 : 1000  
 Y-Maßstab 1 : 200  
 Gewässer-km AGE 7.375



Beauftragt durch  
 ERSA s.à r.l.  
 hydrotec



**ANNEXE 10 : Propriétés du sol, de la nappe et du zinc utilisées pour le calcul du temps de lessivage dans le logiciel F-LEACH**

Paramètres de la zone non-saturée (zone vadose)	Unité	Valeur retenue	Justificatif
Flux d'infiltration	m/an	0.30	Approximation d'après données climatiques
Densité apparente du sol	kg/dm <sup>3</sup>	1.45	Valeur par défaut GRER
Teneur en eau	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	0.41	Approximation d'après la texture
Longueur de la source	m	25.00	X <sub>max</sub> - X <sub>min</sub> (couche de cendres "réaliste")
Epaisseur de la vadose	m	0.60	Epaisseur moyenne
pH <sub>eau</sub>	-	7.80	pH <sub>eau</sub> moyen calculé à partir des résultats analytiques
pH <sub>eau porale</sub>	-	7.75	pH <sub>eau porale</sub> = 1.085 pH <sub>eau</sub> - 0.709
% argile	%	10.25	Pourcentage moyen calculé à partir des résultats analytiques
<b>Paramètres de la zone saturée</b>			
Gradient hydraulique	m/m	0.02	
Perméabilité en zone saturée	m/an	315.36	Perméabilité moyenne pour des sables-limoneux
Epaisseur de la nappe	m	3.00	Valeur conservatoire fixée par convention
<b>Propriétés du polluant (Zn)</b>			
Solubilité	µg/L	98100.00	Valeur par défaut F-LEACH
Constante adimensionnelle d'Henry	-	0.00	-
Coefficient de diffusivité dans l'air	m <sup>2</sup> /an	0.00	-
Kd (en zone non-saturée) (selon régression du GRER pour le zinc)	L/kg	3488.99	Kd calculé à partir du taux d'argile et du pH <sub>eau porale</sub> selon la régression suivante : Kd (L/kg) = 10 <sup>(-0.532+0.425* pH<sub>eau porale</sub> + 0.771 log(% d'argile))</sup> - 0.152 (extraite du GRER (Annexe B.4))
<b>Concentration maximale en Zn dans la couche de cendres</b>			
	mg/kg MS	56000	C1.1 - Concentration maximale mesurée dans le sol à hauteur de la couche de cendres (entre 0 et 20 cm)

**ANNEXE 11 : Paramètres d'entrée et résultats de l'étude de la dispersion  
(tableaux de résultats du logiciel BIOSCREEN).**

Figure 1 : Paramètres d'entrée pour le calcul de la « dispersion » calculée ici à partir de 219.65 µg/L (les paramètres étant identiques pour les autres concentrations testées).

**BIOSCREEN-AT\_1.43\_FR\_v1.1** Système d'aide à la décision basé sur l'atténuation naturelle  
 S.S. Papadopoulos & Associates, Inc. Version 1.43 M.Karanovic (Jul 2007)

**1. HYDROGEOLOGIE**  
 Vitesse effective\* Vs 25 (m/an)  
 Conductivité Hydraulique K 1.0E-03 (cm/sec)  
 Gradient Hydraulique i 0.02 (m/m)  
 Porosité efficace η 0.25 (-)

**2. DISPERSION**  
 Dispersivité Longitudinale\* alpha x 6.300 (m)  
 Dispersivité Transversale\* alpha y 2.079 (m)  
 Dispersivité Verticale\* alpha z 0.353 (m)  
 Longueur de la zone modélisée\* Lp 63 (m)

**3. ADSORPTION**  
 Facteur de retard\* R 23028.3 (-)  
 Densité apparente du sol rho 1.7 (kg/dm³)  
 Coefficient de Partition Koc 38 (L/kg)  
 Fraction de Carbone Organique foc 8.0E-4 (-)

**4. BIODEGRADATION**  
 Coeff. de dégradation de 1<sup>er</sup> ordre\* lambda 0.0E+0 (par an)  
 Demi-vie du soluté t-half 0.01 (an)

**5. GENERAL**  
 Longueur de la zone modélisée\* 63 (m)  
 Largeur de la zone modélisée\* 50 (m)  
 Temps de Simulation\* 100.00 (an)

**6. SOURCE**  
 Epaisseur de la Source 3.0 (m)

**7. DONNEES DE TERRAIN POUR LA COMPARAISON**  
 Concentration (µg/L) 530  
 Dist. à la Source (m) 0 6 13 19 25 32 38 44 50 57 63

**8. CHOIX DU TYPE DE RESULTAT A AFFICHER :**

**Calculer l'atténuation de la C<sub>max</sub> selon la distance**  
**Voir la C<sub>max</sub>**

**Calculer la dispersion du panache**  
**Voir le panache**

Recalculer cette feuille

Restaurer les Formules pour Vs, les dispersivités, R, lambda, et autres

**Lisez-moi**

**Instructions pour les données d'entrée :**  
 1. Entrer directement une valeur...ou  
 2. Calculer à partir des valeurs encodées en gris dans les cellules en dessous.  
 Variable\* Donnée directement utilisée par le modèle.  
 Valeur calculée par le modèle. (N'encodrez aucune donnée)

**Vue en plan du panache**  
 Concentrations observées aux puits de contrôle  
 En l'absence de données, laisser vide ou entrer "0"

Figure 2 : Résultat de la simulation après 100 ans pour une concentration initiale de 219.65 µg/L : atténuation de la concentration en zinc dans l'eau souterraine depuis la couche de cendres jusque la limite aval (à hauteur du cours d'eau de l'Attert).

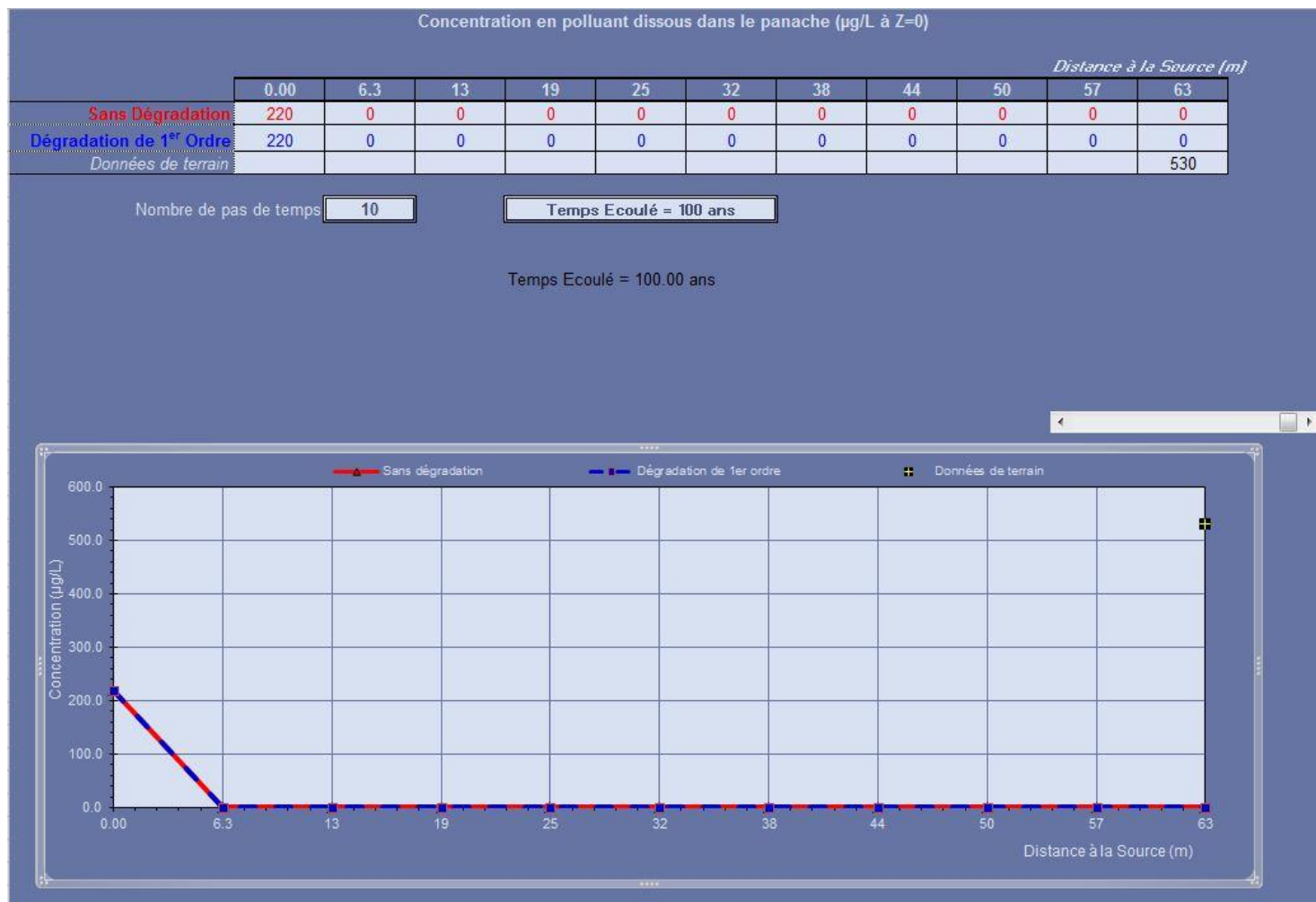


Figure 3 : Résultat de la simulation après 100 ans pour une concentration initiale de 362.91 µg/L : atténuation de la concentration en zinc dans l'eau souterraine depuis la couche de cendres jusque la limite aval (à hauteur du cours d'eau de l'Attert).

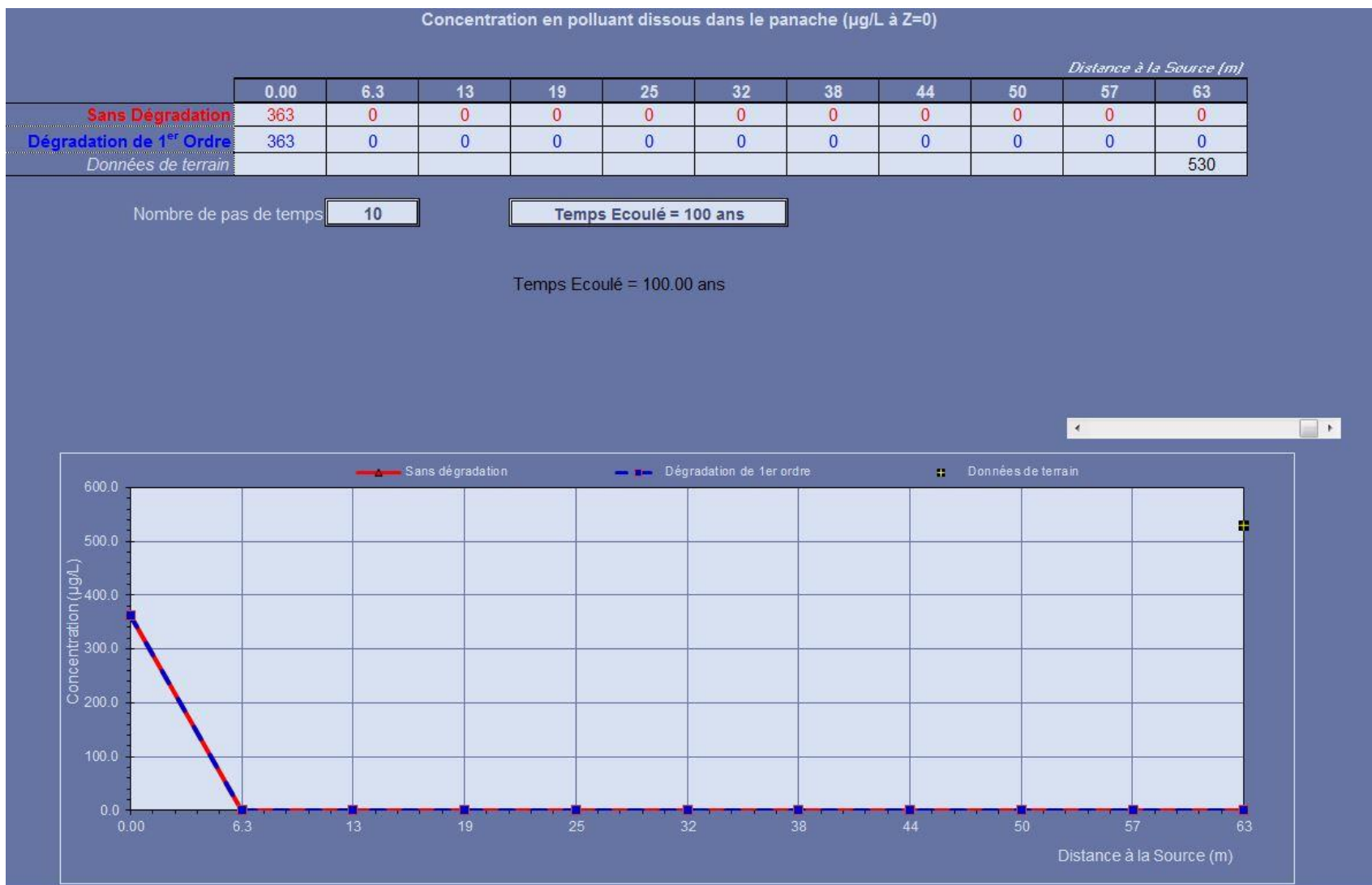


Figure 4 : Résultat de la simulation après 100 ans pour une concentration initiale de 1973.16 µg/L : atténuation de la concentration en zinc dans l'eau souterraine depuis la couche de cendres jusque la limite aval (à hauteur du cours d'eau de l'Attert).



## **ANNEXE 12 : Résultats de l'étude du lessivage (rapport du logiciel F-LEACH)**



# F-LEACH

versie 2.1 (2011)

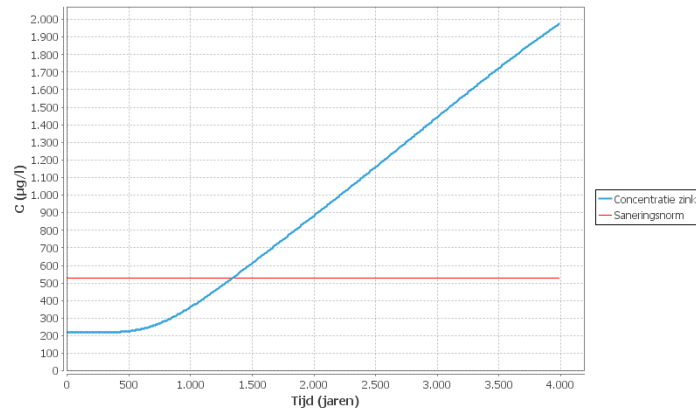


## Project: Luxembourg - Bissen Run: Lessivage - Zinc

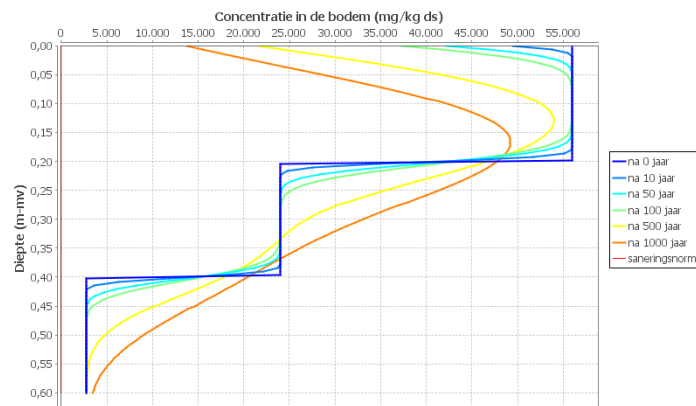
### Bron-pad-receptor Analyse

#### Grafieken

Concentratie zink in het grondwater ter hoogte van de receptor



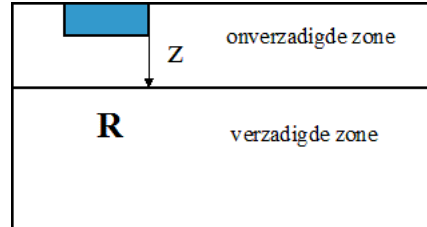
Evolutie bodemkwaliteit



## Ingevoerde gegevens

### Basisscenario

Basisscenario 1: Bodemverontreiniging  
Bron in onverzadigde zone  
Receptor is het grondwater op diepte z onder  
het maaiveld  
(geen grondwaterverontreiniging)  
Pad = z



### Parameters onverzadigde zone

<i>infiltratieflux</i>	$q = 0,3 \text{ m/j}$
<i>bulkdensiteit</i>	$\rho_s = 1,45 \text{ kg/l}$
<i>vochtgehalte</i>	$\theta = 0,41 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$
<i>dispersiecoëfficiënt</i>	$D_1 = 0,037 \text{ m}^2/\text{j}$
<i>dikte onverzadigde zone</i>	$z = 0,6 \text{ m}$
<i>lengte bronzone</i>	$L = 25,0 \text{ m}$

### Parameters verzadigde zone

<i>gradiënt</i>	$i = 0,02 \text{ m/m}$
<i>verzadigde doorlaatbaarheid</i>	$k = 315,36 \text{ m/j}$
<i>mengdiepte</i>	$M_z = 3,0 \text{ m}$
<i>dikte freatische laag</i>	$d = 3,0 \text{ m}$

### Gegevens contaminant

<i>type</i>	zware metalen
<i>naam</i>	zink
<i>oplosbaarheid</i>	$S = 98100,0 \text{ } \mu\text{g/l}$
<i>dimensieloze Henry-coëfficiënt</i>	$H' = 0,0$
<i>diffusiecoëfficiënt in lucht</i>	$Da = 0,0 \text{ m}^2/\text{j}$
<i>saneringsnorm van toepassing</i>	$= 0,0 \text{ mg/kg ds}$
<i>saneringsnorm (gebruikt)</i>	$= 530,0 \text{ } \mu\text{g/l}$
<i>beschrijving saneringsnorm</i>	VDnappe
<i>saneringsnorm (standaard)</i>	$= 500,0 \text{ } \mu\text{g/l}$
<i>verdelingscoëfficiënt in bodem (onverzadigde zone)</i>	$K_{dl} = 3488,99 \text{ l/kg}$

## Resultaat trap 1

$$\begin{aligned} \text{toetsingswaarde} & \quad TW = 6146,14 \text{ mg/kg ds} \\ \text{hoogste gemeten concentratie} & \quad = 56000,0 \text{ mg/kg ds} \end{aligned}$$

Er zijn concentraties gemeten hoger dan TW => risico op uitloging kan niet uitgesloten worden.

Verdere berekening in trap 2 is nodig.

## Initiële condities onverzadigde zone

$$\begin{aligned} \text{achtergrondconcentratie in het grondwater} & \quad C_{gw,0} = 0,0 \text{ } \mu\text{g/l} \\ \text{van de site} & \end{aligned}$$

initiële verdeling van de contaminant in de onverzadigde zone (bodem):

Laag 1	$z = 0 \text{ m}$	tot $z = 0,2 \text{ m}$	met concentratie $56000 \text{ mg/kg}$
Laag 2	$z = 0,2 \text{ m}$	tot $z = 0,4 \text{ m}$	met concentratie $24000 \text{ mg/kg}$
Laag 3	$z = 0,4 \text{ m}$	tot $z = 0,6 \text{ m}$	met concentratie $2700 \text{ mg/kg}$

Verdere toediening of instroom van pollutie bovenaan het bodemprofiel:

*geen verdere toediening*

## Risicotabellen

tijdsduur berekening: 4000 jaar

<b>zink</b>	<b>Risico uitloging/verspreiding</b>
	Receptor is het grondwater onder de bron
	$C_{\max}$ met uitloging ( $\mu\text{g/l}$ )
0,0 - 10,0 jaar	219,65
10,0 - 50,0 jaar	219,65
50,0 - 100,0 jaar	219,65
100,0 - 500,0 jaar	225,93
500,0 - 1000,0 jaar	362,91
1000,0 - 4000,0 jaar	1973,16
VDnappe ( $\mu\text{g/l}$ )	Tijdstip overschrijding norm (jaar)
530,0	1350

<b>zink</b>	<b>Evolutie bodemkwaliteit</b>	
	$C_{\max}$ bodem (mg/kg ds)	% uitgeloogd (cumulatief)
na 0,0 jaar	55999,34	0
na 10,0 jaar	55999,34	0,21
na 50,0 jaar	55999,34	0,37
na 100,0 jaar	55999,34	0,51
na 500,0 jaar	53958,11	1,17
na 1000,0 jaar	49223,17	1,9
	BSN (mg/kg ds)	
	0,0	