

Etat de Vaud

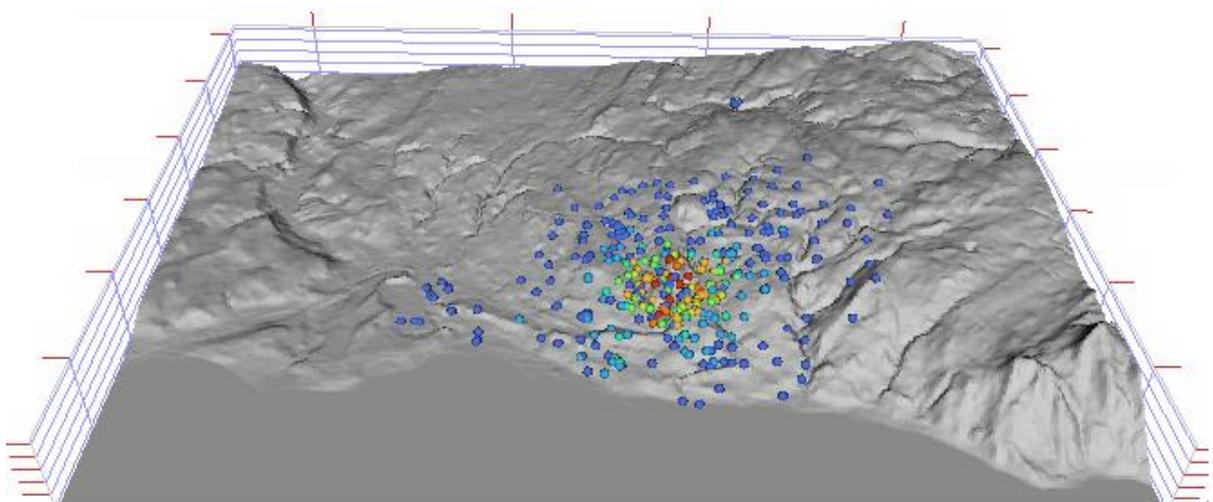
Direction générale de l'Environnement (DGE)
Division Géologie, sols et déchets (GEODE)
Avenu de Valmont 30b
CH-1014 Lausanne

Pollution des sols aux dioxines et furanes dans la région lausannoise

Cartographie géostatistique des classes de pollution potentielle

Rapport final

Décembre 2022



7 chemin de Mont-Riant
CH-2000 Neuchâtel
+41 (0)79 671 96 22
www.eode.ch

Vaud_Cartes_Dioxines_Lausanne_Rapport_eOde_
22Déc22.docx
Rapport final

Limites de responsabilités

L'étude géostatistique a pour objectif de modéliser une réalité connue de façon partielle à partir d'un ensemble de données et d'informations disponibles. Les modèles produits ne sont jamais qu'une façon de représenter la réalité et ne peuvent prétendre y correspondre parfaitement.

Les prestations réalisées sont conformes à l'état de l'art dans le domaine.

En aucun cas, nous ne pourrions être tenus responsables des pertes de production, des pertes de bénéfices ou d'autres pertes et dommages indirects survenant à la suite de l'utilisation des résultats par l'Etat de Vaud.

Notre responsabilité, si elle devait être retenue pour quelque raison que ce soit, ne pourra excéder cinquante pour cent du montant de la prestation payée par l'Etat de Vaud.

Table des matières

Abréviations	6
1. Contexte et objectifs	7
2. Travail réalisé.....	7
3. Conditions de cartographie.....	8
3.1. Types de sol.....	8
3.2. Indicateurs de pollution.....	8
3.3. Valeurs de référence	9
4. Présentation des données	10
4.1. Sources de données	10
4.2. Echantillons de sol	10
4.3. Localisation des échantillons	10
4.4. Contrôle de l'absence d'anomalies	11
4.5. Teneurs totales en PCDD-F dans les échantillons de sol	12
4.5.1. Gamme de teneurs	12
4.5.2. Répartition spatiale des teneurs dans le périmètre d'étude	13
5. Choix méthodologiques	16
5.1. Méthodes géostatistiques	16
5.2. Conditions de modélisation.....	16
6. Cartographie des recommandations sanitaires	18
6.1. Cartes brutes : classes potentielles de teneurs en PCDD-F extraction ASE et niveaux de confiance	18
6.2. Carte publiée par l'Etat de Vaud.....	21
7. Cartographies pour les besoins d'investigation et d'assainissement et pour la gestion des matériaux terreux.....	22
7.1. Cartes brutes : classes potentielles de teneurs en PCDD-F extraction Soxhlet et niveaux de confiance	22
7.2. Cartes publiées par l'Etat de Vaud.....	25
7.2.1. Carte pour les besoins d'investigation et d'assainissement.....	25
7.2.2. Carte pour la gestion des matériaux terreux.....	26
8. Synthèse et recommandations	27
Bibliographie	29
Lexique.....	30

Annexes

Annexe 1 Travaux réalisés et ressources mises en œuvre	36
Annexe 2 Synthèse des résultats de l'analyse statistique multivariée sur les profils de congénères des échantillons de sol	40
Annexe 3 Détail des méthodes et conditions de modélisation géostatistique.....	44

Abréviations

ACP	Analyse en composantes principales
ASE	Méthode d'extraction sous haute pression des dioxines et furanes d'échantillons de sol pour leur analyse au laboratoire
CAH	Classification ascendante hiérarchique
CASIP	Cadastre des sites pollués du canton de Vaud
DGE	Direction générale de l'environnement
GEODE	Division Géologie, sol et déchets
OFEV	Office fédéral de l'environnement
OLED	Ordonnance sur les déchets du 4 décembre 2015 (Etat le 1 ^{er} avril 2022), RS 814.600
OMS	Organisation mondiale de la santé
OSites	Ordonnance sur l'assainissement des sites contaminés du 26 août 1998 (Etat le 1 ^{er} mai 2017), RS 814.680
OSol	Ordonnance sur les atteintes portées aux sols du 1er juillet 1998 (Etat le 12 avril 2016), RS 814.12
PCDD-F	Somme des teneurs en polychlorodibenzodioxines et polychlorodibenzofuranes
ASE	Méthode d'extraction à pression ambiante des dioxines et furanes d'échantillons de sol pour leur analyse au laboratoire
TEF	Facteur d'équivalence toxique
TEQ	Equivalent toxique

1. Contexte et objectifs

En 2021, des teneurs élevées en dioxines et furanes ont été découvertes dans les sols de la région lausannoise. La contamination trouve probablement son origine dans les activités industrielles qui étaient implantées dans le secteur du Vallon de Lausanne par le passé, avec notamment l'ancien incinérateur de la ville qui a fonctionné entre 1958 et fin 2005 (eOde, 2022). Les substances auraient été disséminées par voie aérienne sous forme de gaz ou de particules sous l'effet du vent, puis déposées dans le sol.

En 2021 et 2022, l'Etat de Vaud a engagé plusieurs campagnes de prélèvement et d'analyses des sols pour évaluer le niveau et l'étendue de cette pollution, et a mandaté notre bureau avec un double objectif : optimiser le nombre et la position des points d'échantillonnage des campagnes de terrain, et cartographier les classes potentielles de pollution aux dioxines et furanes. Ces cartes étaient en effet nécessaires pour établir des recommandations sanitaires pour la population, définir des mesures de gestion des sols (restrictions et interdictions d'usage, valorisation des matériaux terreux) en fonction des teneurs attendues dans le périmètre concerné par la pollution et délimiter le périmètre d'investigation et d'assainissement.

Une modélisation géostatistique a été réalisée pour estimer les classes de teneurs en dioxines et furanes les plus probables à partir des données collectées.

Ce rapport synthétise le travail de modélisation réalisé par eOde en 2021 et 2022. Le document décrit les étapes de travail (chapitre 2), ainsi que les conditions de cartographie des sols répondant aux demandes de l'Etat de Vaud (chapitre 3). Les données utilisées pour établir les cartes sont présentées dans le chapitre 4, tandis que les choix méthodologiques adoptés pour modéliser les niveaux de pollution sont résumés au chapitre 5. Les résultats de modélisation sont restitués sous forme de deux séries de cartes aux chapitres 6 et 7. Une synthèse des résultats et des recommandations sont fournies en conclusion au chapitre 8.

2. Travail réalisé

Les cartes présentées dans ce rapport ont été réalisées en deux étapes :

- Une première étude a été confiée à notre bureau (eOde, 2021), afin d'estimer sur le territoire les classes de teneurs en polychlorodibenzodioxines et polychlorodibenzofuranes (PCDD-F) jusqu'à la limite à 20 ng TEQ/ kg ms à partir d'une centaine d'échantillons de sol analysés. Ces travaux ont permis à l'Etat d'établir une carte des recommandations sanitaires par classe de pollution potentielle, avec l'appui du Centre universitaire de médecine générale et santé publique (Unisanté) (Berthet et al., 2021; Vernez et al., 2023),
- En 2022, l'approfondissement de l'évaluation des risques sanitaires et des aspects réglementaires a conduit l'Etat à lancer de nouvelles campagnes de prélèvement pour analyser les sols susceptibles de contenir jusqu'à 5 ng TEQ / kg ms de PCDD-F. Un deuxième mandat a été confié à eOde en mars 2022 pour actualiser les cartographies géostatistiques établies en 2021, en intégrant les données collectées lors de ces campagnes, ainsi que d'autres données rassemblées par la ville de Lausanne et l'Etat de Vaud depuis la fin du premier mandat confié à eOde.

Plus de détails sur les travaux réalisés et les ressources mises en œuvre par notre bureau sont fournies en **Annexe 1**.

3. Conditions de cartographie

3.1. Types de sol

Les cartographies des niveaux de pollution en dioxines et furanes concernent les « **sols de surface** » présents dans les 5 à 20 premiers centimètres de terrain. Elles sont limitées aux sols présents en l'état depuis de nombreuses années, qui ont été soumis à l'influence d'activités industrielles et urbaines historiques de la région lausannoise, sans que leur composition ait été significativement modifiée par des interventions telles que des excavations ou des apports de nouvelles terres. Ces sols sont dénommés « **sols anciens non remaniés** ». Les cartes fournissent donc une **représentation sécuritaire de l'état actuel des sols**, puisqu'elles occultent tous les remaniements postérieurs à la période de contamination, qui ont pu faire abaisser les niveaux de pollution par effet de dilution ou de remplacement des terres.

3.2. Indicateurs de pollution

La variable d'intérêt est la **somme des teneurs en polychlorodibenzodioxines et polychlorodibenzofuranes (PCDD-F)** analysées dans des échantillons de sol, fournie en équivalent toxique (TEQ) afin de pouvoir exprimer la toxicité globale du mélange des substances en une seule valeur. Pour cela, les teneurs analysées des 17 composés - 7 congénères de dioxines et 10 congénères de furanes - sont additionnées après leur avoir attribué une pondération (facteur d'équivalence toxique TEF). Ces poids permettent de tenir compte du degré de toxicité de chacun des congénères par rapport au 2,3,7,8-TCDD pris comme référence, auquel une pondération de 1 a été attribuée. Les facteurs TEF appliqués sont ceux recommandés par l'Organisation mondiale de la santé en 2005 (Tableau 1). Les teneurs inférieures aux limites de quantification sont substituées par 0. La somme des teneurs en PCDD-F ainsi obtenue est exprimée en ng TEQ par kg de matière sèche de sol (ng TEQ / kg ms).

Il existe plusieurs protocoles d'analyse des dioxines et furanes, dont le choix est conditionné par les bases légales à appliquer.

En 2021, les données ont été obtenues à partir de l'analyse d'échantillons de sol soumis à une extraction accélérée des dioxines et furanes par solvant par la **méthode dite ASE**. Des cartes ont été établies et des recommandations sanitaires ont été émises pour ce type de données.

En 2022, les données ont été obtenues à partir de l'analyse d'échantillons soumis à une extraction à pression ambiante par la **méthode dite Soxhlet**. Cette méthode d'analyse préconisée par l'OFEV est requise pour déterminer les besoins d'investigation et d'assainissement des sols exigés par l'Ordonnance sur les sites contaminés (OSites). Elle est également indiquée pour définir les filières de valorisation ou de mise en décharge des matériaux terreux extraits de parcelles potentiellement polluées, par application de l'Ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol) et de l'Ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets (OLED).

Pour pouvoir utiliser la totalité des données ensemble lors de l'établissement des cartes, l'OFEV accepte l'application d'un **facteur de conversion de 42.5%** pour obtenir des teneurs en « **équivalents Soxhlet** » à partir de teneurs issues d'une extraction ASE, ou le facteur inverse pour déduire des « **équivalents ASE** » à partir de teneurs issues d'une extraction Soxhlet. Le facteur de conversion s'appuie sur les résultats d'une expertise demandée par l'OFEV à un laboratoire d'analyse spécialisé (OFEV, 2021).

Ce passage de l'un à l'autre des attributs par ce facteur correctif introduit une incertitude dans l'estimation des niveaux de pollution, mais celle-ci est acceptée par les Autorités cantonales et fédérales, car son niveau est jugé faible par-rapport aux autres sources d'incertitude affectant les

résultats (p.ex. erreur d'échantillonnage et d'analyse, densité et répartition des échantillons dans le périmètre d'étude).

Tableau 1 Congénères et TEF intervenant dans le calcul de la somme TEQ des teneurs en dioxines et furanes.

Groupe	Congénères	TEF OMS 2005
Dioxines	2,3,7,8-TCDD	1
	1,2,3,7,8-PeCDD	1
	1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1
	1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1
	1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1
	1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.01
	OCDD	0.0003
	2,3,7,8-TCDF	0.1
Furanes	1,2,3,7,8-PeCDF	0.03
	2,3,4,7,8-PeCDF	0.3
	1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.1
	1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1
	1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1
	2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.1
	1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.01
	1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.01
	OCDF	0.0003

3.3. Valeurs de référence

Les teneurs totales en PCDD-F en équivalents toxiques sont comparées aux valeurs de référence fournies par l'Etat de Vaud, définies avec l'appui des autorités fédérales et d'un comité scientifique constitué pour répondre aux questions spécifiques posées par la pollution des sols de la région lausannoise :

- Les teneurs en PCDD-F obtenues à partir d'analyses avec extraction ASE (dénommées « **teneurs en PCDD-F extraction ASE** ») sont classées par-rapport aux valeurs **5, 20, 50, 100 et 200 ng TEQ / kg ms**, pour établir les recommandations sanitaires,
- Les teneurs en PCDD-F obtenues à partir d'analyses avec extraction Soxhlet (dénommées « **teneurs en PCDD-F extraction Soxhlet** ») sont classées par-rapport aux **valeurs 5, 20, 75 et 150 ng TEQ / kg ms**, pour définir les mesures de gestion des sols décapés ou investigués.

4. Présentation des données

Les caractéristiques des données utilisées pour cartographier les niveaux de pollution des sols en dioxines et furanes présentées ici ont été déterminées par une analyse exploratoire s'appuyant sur des outils de la statistique et géostatistique descriptives.

4.1. Sources de données

Les données disponibles pour établir les cartographies sont les teneurs totales en PCDD-F (unité : ng TEQ / kg ms) analysées dans **441 échantillons de sol**. Elles proviennent de différentes sources :

- Une partie a été prélevée en 2021 par le bureau Impact-Concept dans le cadre de 4 campagnes d'investigation spécifiques mandatées par l'Etat de Vaud. Les échantillons ont été analysés avec une extraction ASE,
- Une partie sont des données collectées dans le contexte d'autres projets, rassemblées par l'Etat de Vaud et la commune de Lausanne,
- Une partie a été prélevée au printemps 2022 par le bureau Impact-Concept dans le cadre d'une 5^{ème} campagne d'investigation mandatée par l'Etat de Vaud. Les échantillons ont été analysés avec une extraction Soxhlet.

La base de données a été établie par le bureau Impact-Concept.

Les données rassemblées sont des analyses de laboratoire portant sur des échantillons de sol de composition variable, qui ne sont pas tous représentatifs de « sols anciens non remaniés » de surface (5 à 20 premiers cm de sol). **Une sélection de 304 échantillons** a donc été opérée pour réaliser le traitement géostatistique présenté ci-après et établir les cartographies demandées¹. Le nombre de données disponibles pour la modélisation de 2022 est donc fortement accru, par-rapport à celui de 2021 (**126 données disponibles** pour la cartographie établie en 2021).

4.2. Echantillons de sol

Conformément aux recommandations du manuel (OFEV, 2003) sur le prélèvement de sols, les échantillons prélevés lors des campagnes de 2021 et 2022 par le bureau Impact-Concept sont des composites, correspondant au mélange de sols prélevés par des sondages à la tarière (5 à 16 piqures en général) dans une zone ou une placette positionnée dans les parcelles. Les échantillons sont prélevés dans les 5 à 20 premiers centimètres dans des zones enherbées de parcs, jardins ou forêts.

4.3. Localisation des échantillons

Les échantillons de sol ont été positionnés progressivement en 5 campagnes de prélèvement. Les échantillons des premières phases ont été utilisés pour définir le nombre et la position des échantillons des phases suivantes, dans les zones présentant des lacunes d'information. Pour cela, des cartographies géostatistiques intermédiaires ont été établies pour anticiper les niveaux de pollution potentielle et les zones les plus incertaines. Ce processus itératif aboutit finalement à un recouvrement important du périmètre d'étude par des échantillons, jusqu'à atteindre en périphérie la limite des teneurs en PCDD-F inférieures à 5 ng TEQ ASE / kg ms (Figure 1).

¹ Sélection des échantillons « OUI » et « OUI MAIS » de la colonne « A prendre en compte pour la définition des limites » du tableau 1877-Vaud-Tableau_synthese_resultats_complet_24juin2022.xlsx, et élimination de 4 échantillons anormaux.

La position des échantillons a été déterminée à partir des « teneurs en PCDD-F extraction ASE » analysées au laboratoire, ou bien calculées à partir de « teneurs en PCDD-F extraction Soxhlet » corrigées d'un facteur de 42.5%, comme décrit au § 3.2.

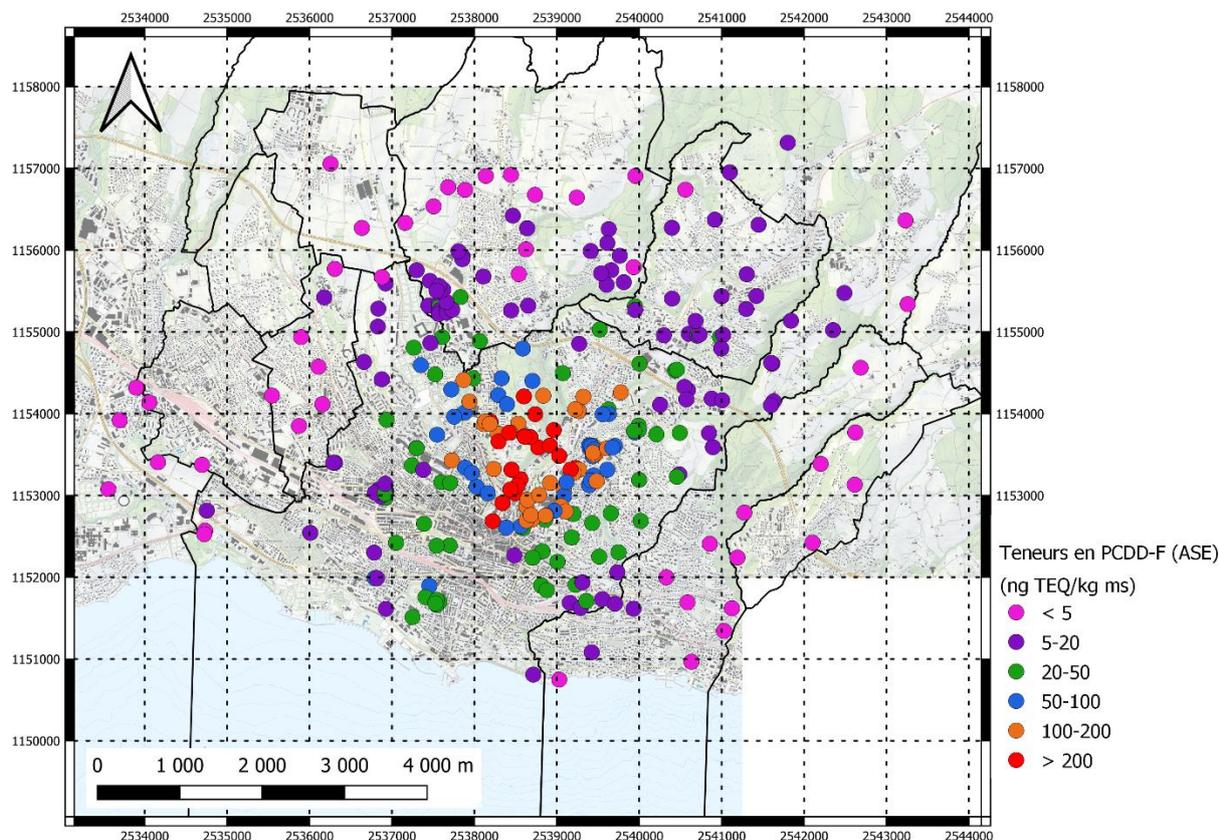


Figure 1 Carte de localisation des échantillons de sol utilisés pour cartographier les niveaux de pollution potentielle aux PCDD-F. Coordonnées en m dans le cadre de référence CH1903+/LV95. Teneurs en PCDD-F extraction ASE.

4.4. Contrôle de l'absence d'anomalies

La carte des teneurs totales en PCDD-F témoigne d'une diminution progressive des valeurs alors que la distance avec le secteur du Vallon augmente. Quelques points d'échantillonnage isolés montrent néanmoins des teneurs plus basses ou plus élevées que les points d'échantillonnage environnants. Ces données pourraient avoir été conservées par erreur dans le jeu de données représentatif des « sols de surface anciens non remaniés », en étant par exemple collectées dans des sols rapportés plus récents.

Une analyse statistique spécifique a été menée pour contrôler que les données sélectionnées pour la modélisation correspondent bien à des sols sous l'influence du même phénomène de pollution, par dissémination aérienne à partir du secteur du Vallon. Si tel est le cas, les proportions des 17 congénères de dioxines et furanes analysés doivent être similaires dans tous les échantillons. A l'inverse, les échantillons dont ces proportions diffèrent significativement des autres, ont probablement un historique et une origine différentes.

L'analyse statistique multivariée a consisté à appliquer conjointement une analyse en composantes principales (ACP) et une classification ascendante hiérarchique (CAH) aux profils formés par les

proportions de congénères de tous les échantillons sélectionnés pour la cartographie², selon une approche de forensie environnementale déjà utilisée par eOde pour identifier les sources possibles de pollution aux dioxines et furanes de la région lausannoise (eOde, 2022).

L'analyse statistique multivariée fait apparaître que les profils de congénères des échantillons de sol évoluent alors que la distance avec le secteur du Vallon augmente, indiquant que la ou les sources de pollution étaient bien localisées dans le Vallon. Les proportions de congénères évoluent avec la distance sous l'influence des phénomènes biologiques, physiques et chimiques intervenant dans la dispersion et le dépôt des dioxines et furanes dans les sols.

Mais l'analyse n'indique pas d'échantillons isolés dont le profil se différencierait de ceux situés à même distance du secteur du Vallon. L'analyse statistique ne met donc pas en évidence d'anomalies dans les échantillons et analyses sélectionnés pour établir les cartographies des niveaux potentiels de pollution. La totalité des données ont donc été conservées.

Les graphiques de synthèse des principaux résultats obtenus par l'analyse statistique multivariée figurent en **Annexe 2** du rapport.

4.5. Teneurs totales en PCDD-F dans les échantillons de sol

4.5.1. Gamme de teneurs

Une large gamme de teneurs en PCDD-F ont été analysées dans les échantillons de sol dans le périmètre d'étude, comme en témoignent les statistiques élémentaires calculées sur les données correspondant à une extraction ASE ou Soxhlet (Tableau 2) :

- Les teneurs en PCDD-F extraction ASE varient de 0.10 à 640 ng TEQ / kg ms. Elles sont en moyenne égales à 64 ng TEQ / kg ms,
- Les teneurs en PCDD-F extraction Soxhlet varient de 0.06 à 368 ng TEQ / kg ms. Elles sont en moyenne égales à 37 ng TEQ / kg ms. Les teneurs Soxhlet sont plus faibles, du fait de l'application du facteur de conversion de 42.5% (cf. § 3.2).

Tableau 2 Statistiques élémentaires des teneurs totales en PCDD-F analysées dans les 304 échantillons de sol de surface retenus pour la cartographie géostatistique des niveaux de pollution dans le périmètre d'étude. Un dégroupement a été appliqué pour réduire l'effet de grappes de données. Unité : ng TEQ / kg ms.

PCDD-F	Nombre	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	P5%	Médiane	P95%
Extraction ASE	304	0.10	640	64	102	1	21	246
Extraction Soxhlet	304	0.06	368	37	59	0.6	12	141

PX% : Percentile X%.

Remarque : Ces statistiques ont été calculées en appliquant un dégroupement spatial, consistant à attribuer un poids moindre aux données regroupées qu'à celles qui apparaissent isolées. La carte de répartition des données dans le périmètre d'étude (Figure 1) fait en effet apparaître quelques groupes d'échantillons séparés de très petites distances (grappes), qui peuvent nuire à la représentativité des statistiques.

² Les profils de congénères ont été calculés à partir du tableau des teneurs en congénères fourni par le bureau Impact-Concept 1877-Vaud-Tableau_resultats_congenere_complet_24juin2022.xlsx.

4.5.2. Répartition spatiale des teneurs dans le périmètre d'étude

Cartes de répartition spatiale des teneurs

La répartition spatiale des teneurs en PCDD-F extraction ASE est visible sur la carte de la Figure 1. Les teneurs sont représentées selon une échelle de couleur par classes de teneurs délimitées par les seuils 5 – 20 – 50 – 100 – 200 ng TEQ ASE / kg ms (seuils requis pour établir des recommandations sanitaires).

La répartition spatiale des teneurs en PCDD-F extraction Soxhlet est représentée sur la carte de la Figure 2. Les teneurs figurent selon une échelle de couleur par classes de teneurs délimitées par les seuils 5 – 20 – 75 – 150 ng TEQ Soxhlet / kg ms (seuils requis pour déterminer les mesures d'investigation, d'assainissement et de gestion des mouvements de matériaux terreux).

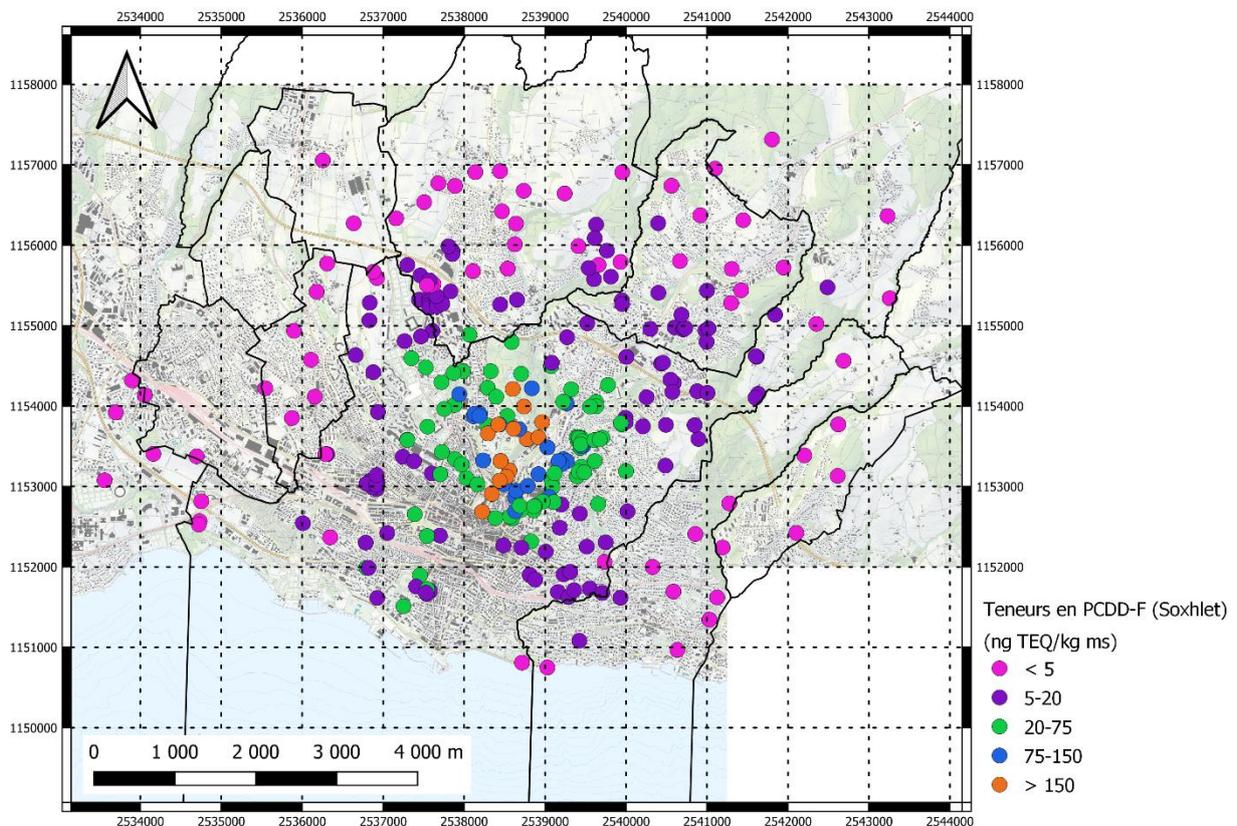


Figure 2 Carte de répartition des teneurs en PCDD-F extraction Soxhlet dans les échantillons de sol utilisés pour cartographier les niveaux de pollution potentielle aux PCDD-F. Coordonnées en m dans le cadre de référence CH1903+/LV95.

L'analyse exploratoire révèle plusieurs facteurs explicatifs à la répartition spatiale des teneurs en dioxines et furanes observée sur les échantillons.

Relation avec la distance au Vallon et le relief

Les cartes des Figure 1 et Figure 2 montrent que les teneurs en PCDD-F les plus élevées ont été mesurées dans les sols du secteur du Vallon, et que celles-ci diminuent alors que la distance entre le point d'échantillonnage du sol et le secteur du Vallon augmente.

L'éloignement des points d'échantillonnage du quartier du Vallon n'est cependant pas le seul facteur explicatif de la répartition des teneurs dans le périmètre d'étude, car si tel était le cas, les teneurs diminueraient de manière concentrique à partir du Vallon. L'analyse exploratoire témoigne de l'effet conjoint de la distance au Vallon et du relief assez accidenté dans le périmètre d'étude (Figure 3) : les

secteurs de plus haute altitude dominant le Vallon semblent avoir limité la dispersion aérienne des poussières ou des gaz à de courtes distances, tandis que les zones basses auraient favorisé leur transport sur de grandes distances.

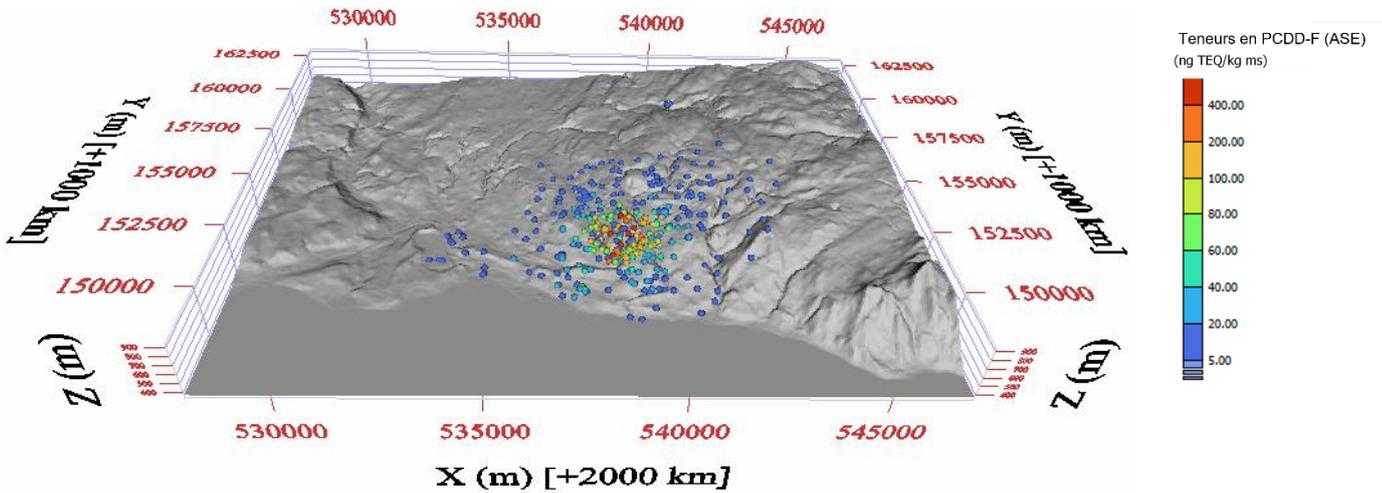


Figure 3 Vue 3D de la surface topographique dans le périmètre d'étude, et des teneurs en PCDD-F extraction ASE analysées dans les 304 échantillons de sol. Coordonnées en m dans le cadre de référence CH1903+/LV95. L'axe vertical est exagéré 3 fois.

Il s'ensuit une relation entre les teneurs en PCDD-F et une dérive - fonction conjuguant la distance au Vallon et la différence d'altitude entre le point d'échantillonnage et un point d'émission hypothétique des dioxines et furanes dans le quartier du Vallon – représentée à la Figure 4.

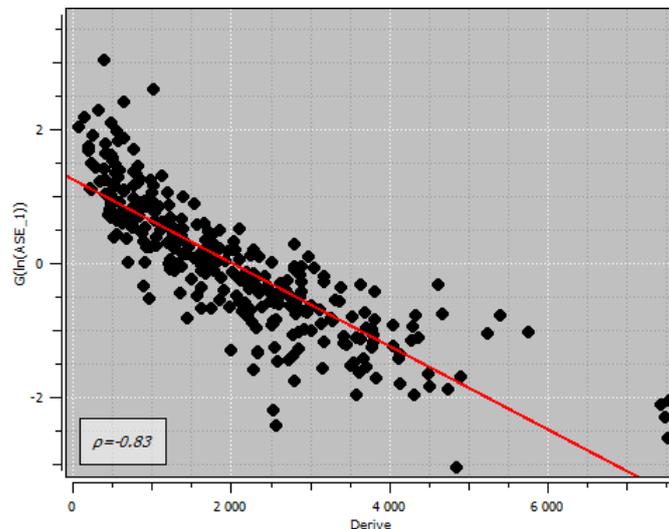


Figure 4 Diagramme représentant les teneurs en PCDD-F extraction ASE en fonction de la dérive combinant la distance au Vallon et la différence d'altitude entre les échantillons de sol et le point d'émission supposé des polluants (ρ : coefficient de corrélation linéaire entre les 2 variables, ligne rouge : loi de régression ajustée sur les données).

Influence des vents dominants

Une dissémination aérienne de la pollution sous forme gazeuse ou particulaire étant fortement suspectée, une attention particulière a été portée à la relation entre la répartition spatiale des teneurs en dioxines et furanes et la direction des vents dominants.

Deux outils spécifiques de la géostatistique ont été utilisés à cet effet :

- Le variogramme, permettant de mesurer les variations de teneurs par couple de points d'échantillonnage à mesure que leur distance de séparation augmente,
- La surface variographique, représentation graphique de l'ensemble des variogrammes calculés dans toutes les directions de l'espace.

La Figure 5 représente les résultats obtenus sur les données des teneurs en PCDD-F extraction ASE³. La surface variographique⁴ témoigne d'une anisotropie aux plus petites distances de séparation des couples de points d'échantillonnage (≤ 2000 m), qui s'estompe aux plus grandes distances. La comparaison de cette surface variographique (a) à la rose des vents du secteur (b) suggère que la dissémination de la pollution s'est effectuée à plus grande distance dans la direction 45° des vents dominants.

Mais cette anisotropie s'estompe aux plus grandes distances de séparation des couples de points d'échantillonnage. Cette situation nous semble vraisemblable, car les teneurs en dioxines et furanes sont très faibles à grande distance du secteur du Vallon, et sont probablement soumises à d'autres facteurs de dispersion, de sorte qu'il est plus difficile d'y « capter » l'effet anisotrope des vents sur les teneurs analysées sur les échantillons.

Les variations spatiales des teneurs à grande distance ont tendance à masquer celles des teneurs à plus petite distance. Il s'ensuit qu'après comparaison des performances de différents variogrammes, le variogramme retenu pour la suite de la modélisation est isotrope (c). Celui-ci indique que le phénomène à l'origine de la pollution aux dioxine et furanes a une influence jusqu'à 3500 m du secteur du Vallon (Figure 5).

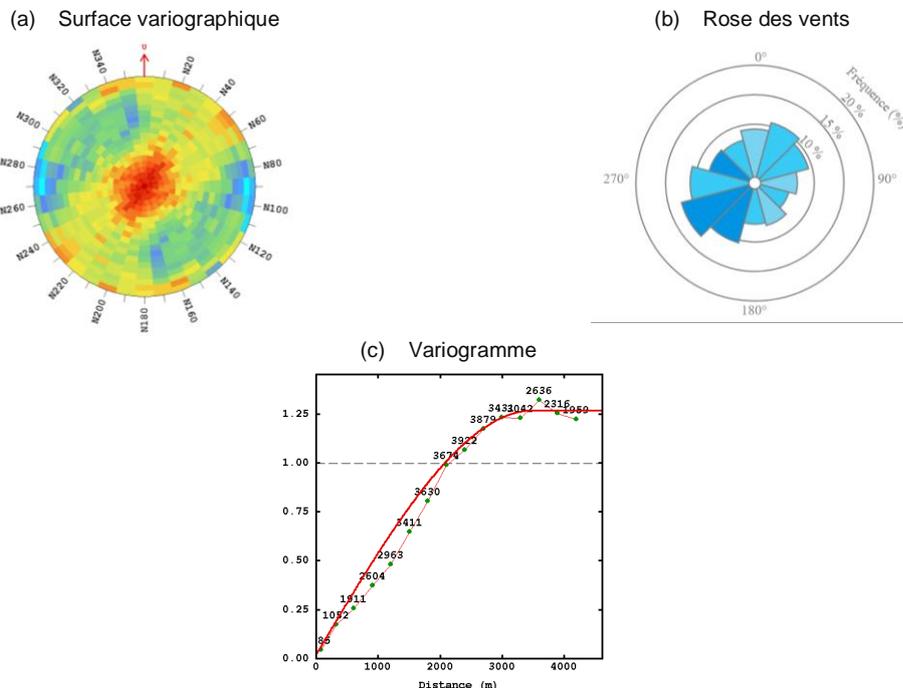


Figure 5 Surface variographique (a) et variogramme (c) des teneurs en PCDD-F extraction ASE comparés à la rose des vents (b) d'une station météorologique proche du Vallon.

³ Les résultats obtenus sur les teneurs extraction Soxhlet sont identiques, puisque les variogrammes sont basés sur des écarts entre teneurs, et non sur les teneurs elles-mêmes.

⁴ La surface variographique est calculée pour des distances allant de 0 à 5000 m.

5. Choix méthodologiques

Les méthodes et conditions de modélisation géostatistique des teneurs totales en PCDD-F sont résumées dans ce chapitre. Les détails techniques de réalisation des cartographies sont fournis en **Annexe 3**.

5.1. Méthodes géostatistiques

Les cartes des niveaux de pollution du sol aux dioxines et furanes ont été établies à partir des données disponibles en utilisant des méthodes géostatistiques (Chilès, Jean-Paul and Delfiner, Pierre, 2012; Cressie, Noel A., 1993; Goovaerts, 1997). La géostatistique regroupe un large éventail d'outils mathématiques qui permettent d'estimer les valeurs prises par une variable d'intérêt – ici la teneur totale en dioxines et furanes dans les sols de surface – en dehors des points de données, ou de toute autre variable construite à partir de la variable d'intérêt.

Ces méthodes ont été développées dans les années 1950' pour les besoins de l'industrie minière, pour estimer les réserves récupérables en minerais (Krige, 1951), et formalisées dans les années 1960' par Prof. Georges Matheron et son équipe de recherche de l'Ecole des Mines de Paris (Matheron, 1965). Depuis, elles ont connu un essor considérable dans des domaines très variés (pétrole, météorologie, pédologie, etc.). Dans le domaine des sites et sols pollués, ces méthodes ont été expérimentées dans le milieu académique dans les années 2000', puis utilisées de manière opérationnelle à partir des années 2010' (ADEME, 2018; Demougeot-Renard, 2002; Desnoyers, 2010; Jeannee, 2001; Lion et al., 2015; RECORD, 2016; Sauvaget, 2019; UPDS, 2016).

Par-rapport à d'autres méthodes de cartographie, les méthodes géostatistiques présentent deux principaux atouts :

- Elles se basent uniquement sur les données pour décrire comment une propriété – ici la teneur en dioxines et furanes dans le sol - varie dans le périmètre d'étude,
- Elles permettent d'attribuer un niveau de confiance aux valeurs estimées. Une incertitude d'estimation, écart entre la valeur estimée et la valeur « vraie », peut en effet être calculée de manière rigoureuse en chaque unité géographique du domaine dans le cadre formel (probabiliste) de ces méthodes. Le niveau de confiance des valeurs estimées tient à la fois au nombre, à la disposition et à la qualité des données disponibles, ainsi qu'à l'hétérogénéité de répartition de la pollution : il est d'autant plus élevé que les données sont nombreuses et bien réparties dans le périmètre d'étude, et que la pollution est homogène.

Les unités géographiques désignent des surfaces ou des volumes de petite taille dont l'ensemble constitue le domaine à cartographier. Dans cette étude, l'unité est une surface de sol de 50 m par 50 m, constitutive d'une grille à mailles régulières recouvrant le domaine d'intérêt.

5.2. Conditions de modélisation

Conformément aux règles de l'art, les conditions de modélisation des teneurs totales en PCDD-F ont été définies après l'analyse exploratoire des données résumée au chapitre 4, en fonction des caractéristiques marquantes mises en évidence dans cette étape :

- Les teneurs diminuent alors que la distance des points de prélèvement au quartier du Vallon augmente. Leur diminution est plus « lente » dans la direction des vents dominants SW-NE, que dans la direction opposée pour des distances ≤ 2500 m. Au-delà de ces distances où les teneurs sont plus faibles, cette anisotropie n'est plus observée. Les teneurs ont été estimées dans un modèle de variogramme captant ces variations spatiales observées sur les données,

- La diminution des teneurs ne dépend pas seulement de la distance au secteur du Vallon et de la direction des vents, mais également des différences d'altitude entre les points de prélèvement du sol et un point d'émission hypothétique de la pollution du quartier du Vallon. Le relief plutôt accidenté du périmètre d'étude crée en effet des zones hautes de barrage à la pollution, ou au contraire des zones basses de dispersion préférentielle sur de grandes distances. Les teneurs ont donc été modélisées en tenant compte de la relation mise en évidence entre les teneurs, et une dérive combinant la distance et la différence d'altitude entre le point d'échantillonnage et un point d'émission des PCDD-F hypothétique positionné dans le quartier du Vallon.

Parmi les différentes méthodes géostatistiques disponibles (Chilès, Jean-Paul and Delfiner, Pierre, 2012), le choix s'est porté sur la génération de simulations conditionnelles des teneurs avec dérive externe, dans le modèle de variogramme évoqué plus haut. Un total de 1000 simulations a été généré, chacune étant une représentation réaliste de la répartition spatiale des teneurs dans les sols. Les petites différences entre les simulations reflètent l'incertitude attachée à la cartographie de ces teneurs, qui ne sont mesurées qu'en un nombre limité de points.

Cette méthode permet en effet de répondre à la demande de l'Etat de Vaud, de disposer d'une cartographie des classes de teneurs les plus probables en chaque unité géographique du périmètre d'étude. Deux cartes sont ainsi produites à partir des 1000 simulations :

- Une carte de la classe la plus probable attribuée à chaque unité géographique du domaine,
- Une carte du niveau de confiance attribué à la classe en chaque unité, exprimé en probabilité d'appartenance à la classe. La probabilité prend des valeurs allant de 0% lorsque le niveau de confiance est nul, à 100% lorsque la classe attribuée est presque certaine. Le niveau de confiance de 100% est obtenu dans une unité géographique lorsque le sol y a été échantillonné et analysé.

Les cartes sont produites à partir d'une grille de calcul 2D recouvrant le domaine d'étude, de mailles carrées de 50 m de côté. La grille 2D est composée de 114000 mailles, recouvrant une surface de 285 km². Les teneurs simulées sont des valeurs de bloc, c'est-à-dire des valeurs représentatives de la moyenne des teneurs dans le sol contenu dans chacune des mailles de la grille de calcul. Ces conditions de modélisation ont été retenues pour que les résultats se rapprochent le plus de valeurs moyennes représentatives de l'état des sols à l'échelle d'une parcelle cadastrale de taille « standard ».

6. Cartographie des recommandations sanitaires

La carte des recommandations sanitaires se base sur la carte brute de classification des sols la plus probable issue du traitement géostatistique des teneurs en PCDD-F extraction ASE présentée ci-après.

6.1. Cartes brutes : classes potentielles de teneurs en PCDD-F extraction ASE et niveaux de confiance

Résultats

La carte de classification la plus probable des sols anciens non remaniés de surface (5 à 20 premiers cm de sol) en fonction des niveaux de teneurs en PCDD-F extraction ASE est présentée à la Figure 7. La carte des niveaux de confiance attribués à la classification apparaît à la Figure 8. L'association des deux cartes fournit **deux informations complémentaires indissociables** en chaque unité du périmètre :

- 1) L'intervalle de teneur auquel la teneur réelle en polluants a le plus de « chance » d'appartenir,
- 2) Sa probabilité d'appartenir à la classe, c'est-à-dire la précision avec laquelle cette classification est estimée. Le niveau de confiance varie de 0% à 100%, selon le niveau d'information à disposition sur l'état de pollution des sols dans l'unité, et son hétérogénéité. Le sol a un risque nul d'appartenir à la classe avec une probabilité de 0%, moyen si la probabilité est de 50%, très fort avec une probabilité de 100%.

Répartition spatiale des niveaux de pollution

La carte de la Figure 7 met en évidence une dispersion des dioxines et furanes à plus grande distance dans la direction SW-NE des vents dominants, que dans la direction orthogonale. L'anisotropie observée sur les données est donc bien reflétée par la carte. Les teneurs diminuent fortement alors que la distance au quartier du Vallon augmente, confortant l'hypothèse que la source de la pollution se situe dans ce secteur.

Niveaux de confiance des cartes de classification des sols

Les cartes des Figure 7 et Figure 8 montrent aussi que les sols situés au cœur du Vallon sont classés dans la catégorie > 200 ng TEQ ASE / kg ms avec une probabilité élevée, allant de 80 à 100% suivant l'unité géographique, ainsi que les zones investiguées en périphérie < 20 ng TEQ ASE / kg ms⁵ (niveaux de confiance de couleur verte à bleue à la Figure 8). Les niveaux de confiance sont plus faibles dans les zones où le sol a été classé dans les intervalles 20 – 50 et 50 – 100 ng TEQ ASE / kg ms (niveaux de confiance de couleur jaune à vert clair à la Figure 8). Les bons niveaux de confiance sont observés dans les secteurs présentant un bon recouvrement par les données collectées. L'optimisation des campagnes d'échantillonnage et d'analyse de 2021 pour déterminer la limite des teneurs en PCDD-F extraction ASE à 20 ng TEQ ASE / kg ms, puis de la campagne de 2022 pour déterminer la limite des teneurs à 5 ng TEQ ASE / kg ms, contribue clairement à ces bons résultats.

Le graphe de la Figure 6 représentant les niveaux de confiance associés aux classes attribuées aux différentes unités géographiques confirme ces observations menées sur les cartes. En effet, les niveaux de confiance des classes ASE 20 – 50 et 50 - 100 apparaissent en moyenne plus faibles que ceux attribués aux autres classes.

Les zones de transition entre 2 classes apparaissent marquées par une plus grande incertitude que les zones éloignées des limites de classe. Il est en effet plus difficile d'attribuer la classe 5 – 20 ou 20 – 50

⁵ Dans ces zones : tant que des données y ont été collectées de part en part.

par exemple, à une teneur estimée de 22 ng TEQ / kg ms, qu'à une teneur de 10 ou 45 ng TEQ / kg ms.

La superposition des points d'échantillonnage à la carte de classification de la Figure 7 indique que la teneur analysée dans quelques échantillons n'est pas cohérente avec la classe de teneurs attribuée à la zone où ils sont positionnés (teneur plus faible que l'intervalle estimé, ou au contraire teneur plus élevée, selon les échantillons). Une analyse statistique multivariée sur les profils de congénères en dioxines et furanes a été menée pour évaluer si ces échantillons étaient des anomalies, par-rapport au reste des données (§ 4.4). Ces échantillons n'apparaissent pas différenciés des autres par leur profil, ils ne semblent donc pas avoir été en dehors de l'influence des activités historiques du secteur du Vallon. Ils peuvent éventuellement représenter des sols impactés, qui ont été déplacés, mais sans que nous disposions d'éléments pour confirmer cette hypothèse. Ces échantillons isolés n'ont finalement pas d'influence sur la délimitation générale des zones en fonction de leur niveau de pollution potentielle.

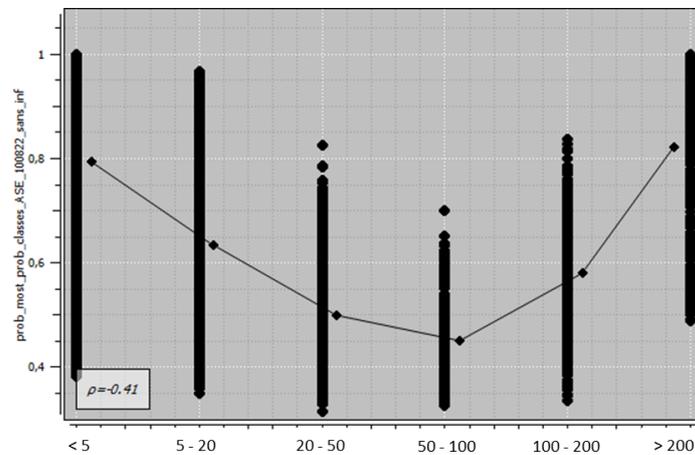


Figure 6 Diagramme représentant les classes de teneurs en PCDD-F extraction ASE les plus probables (unité : ng TEQ ASE / kg ms) en fonction de leur niveau de confiance. Intervalles de teneurs définis par les seuils 5, 20, 50, 100 et 200 ng TEQ ASE / kg ms. La ligne noire représente l'espérance conditionnelle du niveau de confiance.

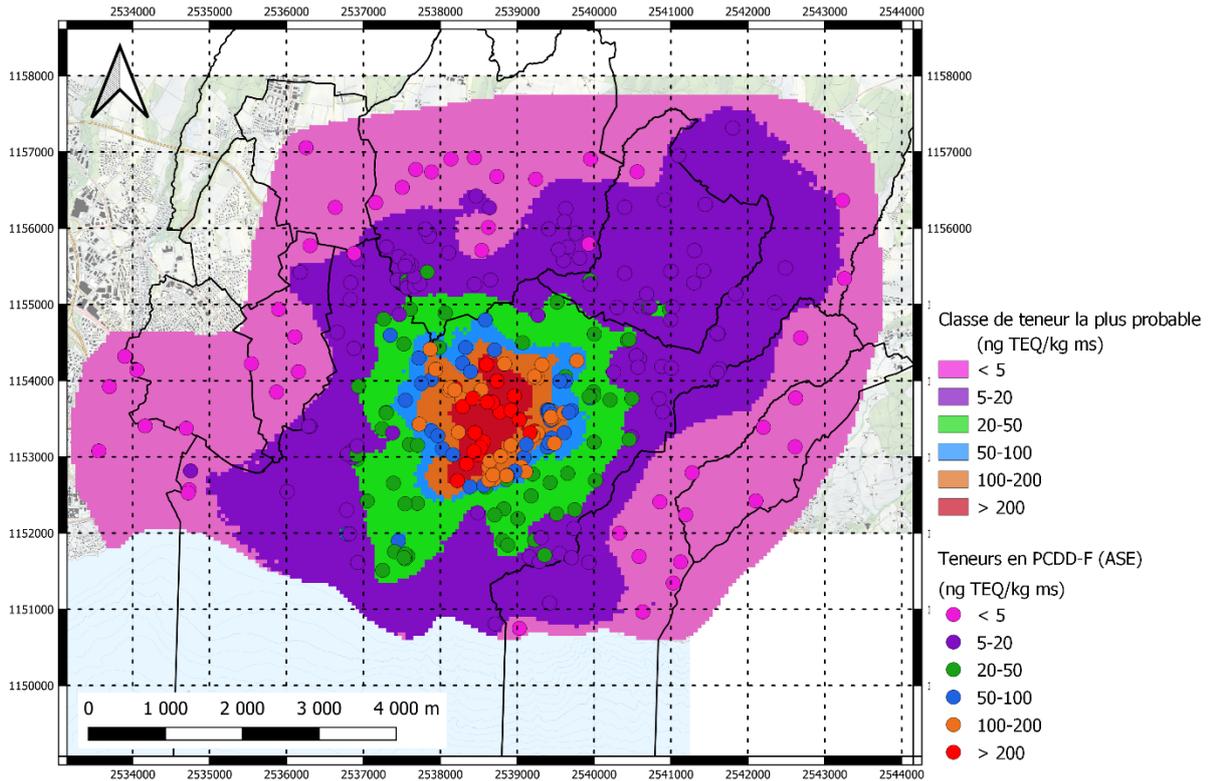


Figure 7 Carte de classification des sols dans les classes de teneurs en PCDD-F extraction ASE les plus probables. Résultat brut obtenu à partir de 1000 simulations de teneurs de bloc. Coordonnées en m dans le cadre de référence CH1903+/LV95. Les niveaux de teneurs analysées dans les échantillons de sol sont représentés en surimposition.

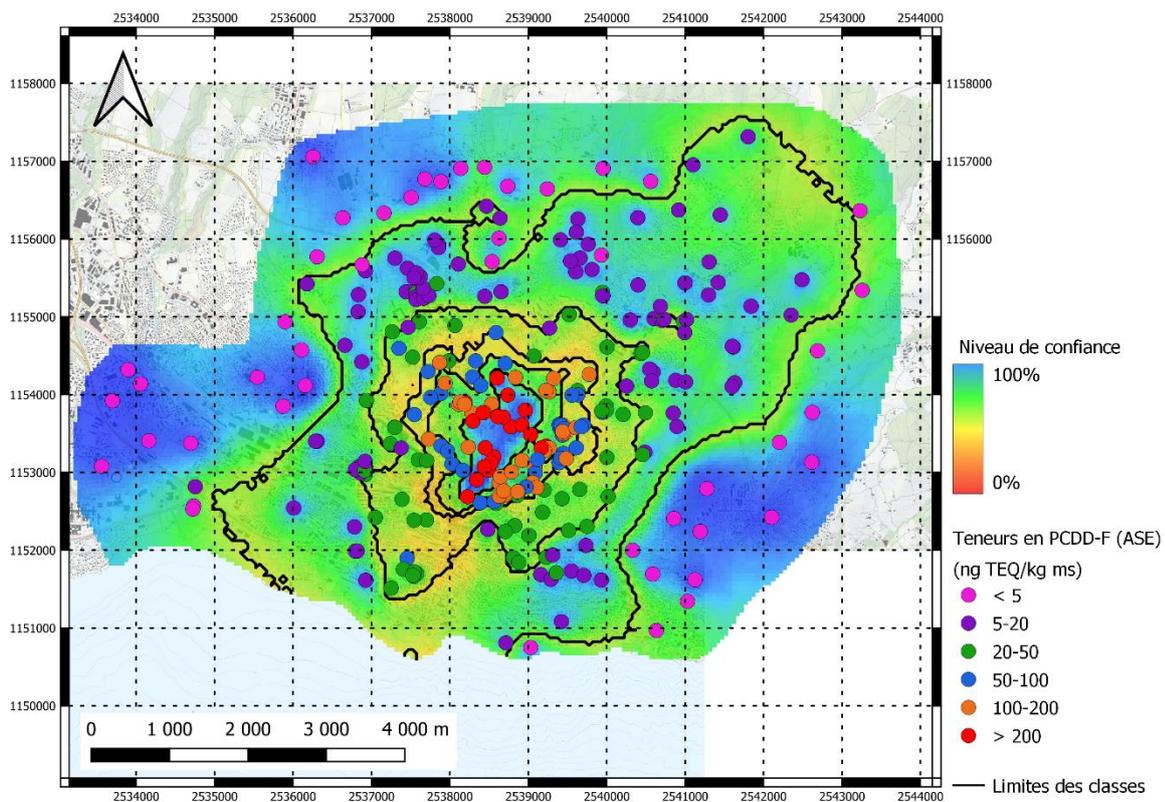


Figure 8 Carte des niveaux de confiance attribués à la classification des sols de la Figure 7. Résultat brut obtenu à partir de 1000 simulations de teneurs de bloc en PCDD-F extraction ASE. Les niveaux de teneurs analysées dans les échantillons de sol et les limites de classe de la Figure 7 sont représentés en surimposition. Coordonnées en m dans le cadre de référence CH1903+/LV95.

6.2. Carte publiée par l'Etat de Vaud

La carte finale (Figure 9) publiée sur le géoportail <https://www.geo.vd.ch/> a été définie par l'Etat de Vaud avec l'OFEV et Unisanté. Elle se base sur la carte géostatistique présentée à la Figure 7 ainsi que sur des éléments sanitaires et réglementaires à prendre en considération pour cette pollution. Les niveaux de confiance à attribuer aux classes de teneurs en PCDD-F sous-jacentes à la carte sont ceux cartographiés à la Figure 8.

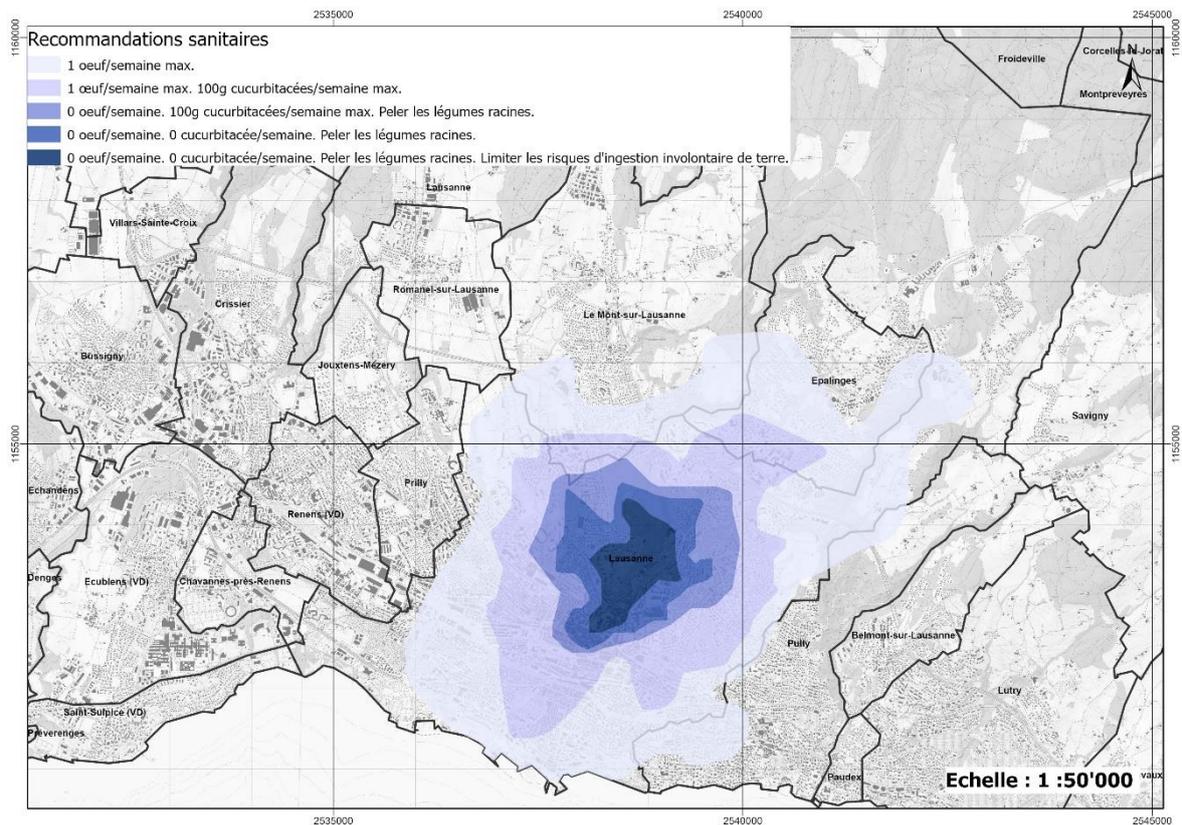


Figure 9 Carte de recommandations sanitaires publiée par l'Etat de Vaud. Coordonnées en m dans le cadre de référence CH1903+/LV95.

7. Cartographies pour les besoins d'investigation et d'assainissement et pour la gestion des matériaux terreux

Les cartes délimitant les zones nécessitant des investigations ou définissant les contraintes attachées au mouvement de terres décapées se fondent sur la carte de classification des sols en fonction des teneurs en PCDD_F extraction Soxhlet présentée ci-après.

7.1. Cartes brutes : classes potentielles de teneurs en PCDD-F extraction Soxhlet et niveaux de confiance

Comme les cartes brutes des intervalles de teneurs potentiels des teneurs en PCDD-F extraction ASE, pour les intervalles <5, 5 - 20, 20 – 50, 50 – 100, 100 – 200 et > 200 (Figure 7 et Figure 8), le traitement géostatistique des teneurs en PCDD-F extraction Soxhlet conduit à la mise au point de 2 cartes :

- La carte de classification la plus probable dans les intervalles < 5, 5 – 20, 20 – 75, 75 – 150 et > 150 ng TEQ / kg ms (Figure 11),
- La carte des niveaux de confiance à attribuer à cette classification, exprimés en probabilités d'appartenance à la classe, variant de 0% à 100% (Figure 12).

Les cartes de classification construites à partir des teneurs ASE et des teneurs Soxhlet ne sont pas directement comparables, puisqu'elles concernent la classification de teneurs obtenues par des méthodes d'extraction différentes auxquelles des seuils différents sont appliqués.

Une seule comparaison peut être menée, pour vérifier la cohérence des résultats. Deux seuils sont identiques dans les 2 cartes : 5 et 20 ng TEQ / kg ms, appliqués à des teneurs ASE ou Soxhlet. On note que les limites à 5 et 20 ng TEQ / kg ms des cartes établies à partir des teneurs ASE englobent respectivement les limites à 5 et 20 ng TEQ / kg ms des cartes obtenues à partir des teneurs Soxhlet : ce résultat est logique puisque que les limites à 5 et 20 ng TEQ ASE / kg ms équivalant à 3 et 14 ng TEQ Soxhlet/ kg ms.

Comme la carte de classification estimée sur les teneurs ASE dans les intervalles <5, 5 - 20, 20 – 50, 50 – 100, 100 – 200 et > 200 ng TEQ ASE / kg ms, la carte de classification estimée sur les teneurs Soxhlet présente des niveaux de confiance variables. Ces niveaux de précision apparaissent néanmoins globalement plus élevés que ceux de la carte de classification sur teneurs ASE. Cette différence pourrait trouver son explication dans le nombre de classes considérées : il est plus faible pour la carte de classification des teneurs Soxhlet, ce qui rendrait l'attribution des classes plus fiables qu'avec les 6 intervalles de teneurs appliqués au teneurs ASE.

Les cartes et le graphe de la Figure 10 indiquent que les niveaux de confiance les plus faibles en moyenne correspondent aux classes de teneurs 20 – 75 et 75 – 150 ng TEQ Soxhlet / kg ms.

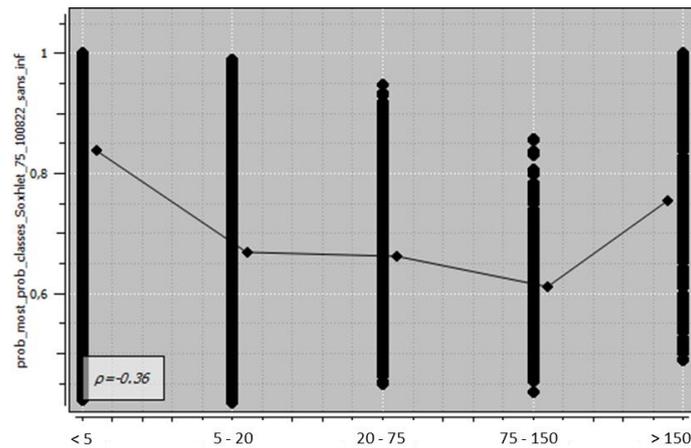


Figure 10 Diagramme représentant les classes de teneurs en PCDD-F extraction Soxhlet les plus probables (unité : ng TEQ Soxhlet/ kg ms) en fonction de leur niveau de confiance. Intervalles de teneurs définis par les seuils 5, 20, 50, 75,100 et 150 ng TEQ Soxhlet/ kg ms. La ligne noire représente l'espérance conditionnelle du niveau de confiance.

Enfin, quelques échantillons isolés sont dans une zone de classification qui ne correspond pas à leur teneur analysée en PCDD-F, mais sans que l'analyse statistique de leur profil de congénères (§ 4.4) permette de les identifier comme des anomalies non représentatives de sols anciens non remaniés.

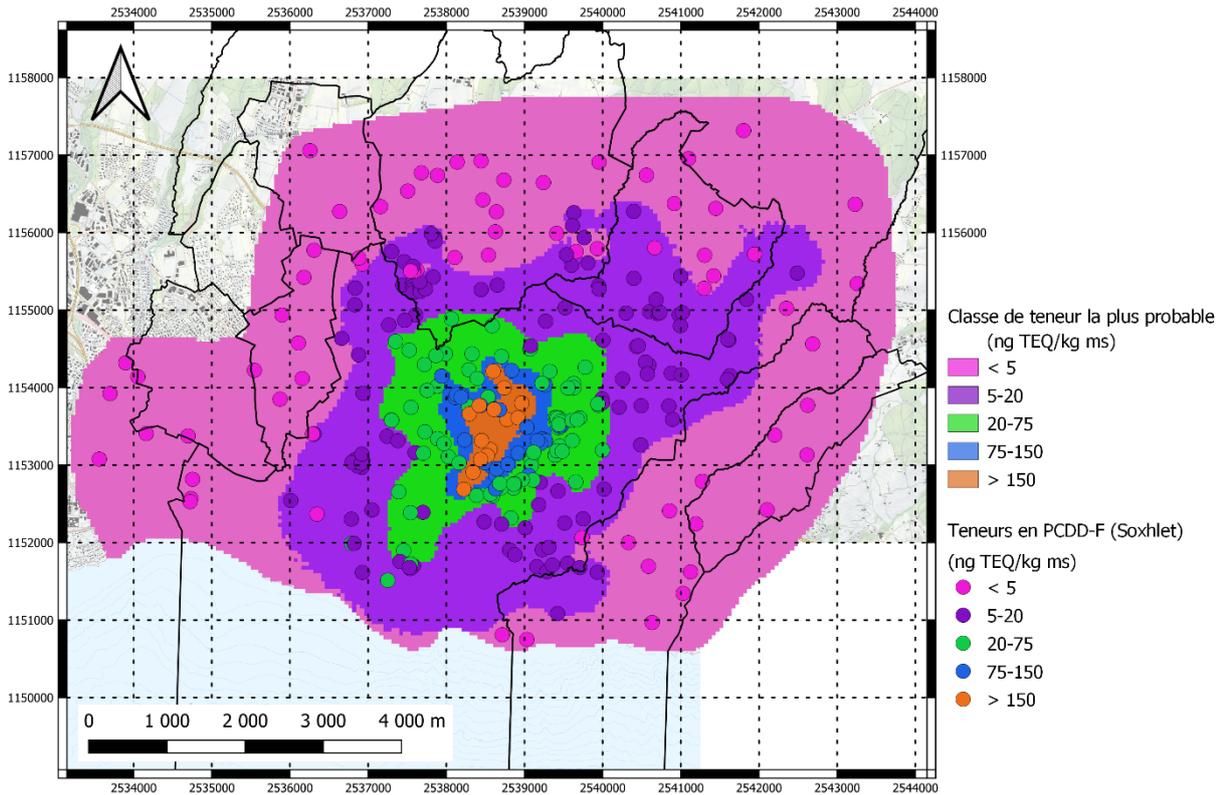


Figure 11 Carte de classification des sols dans les classes de teneurs en PCDD-F extraction Soxhlet les plus probables. Résultat brut obtenu à partir de 1000 simulations de teneurs de bloc. Coordonnées en m dans le cadre de référence CH1903+/LV95. Les niveaux de teneurs analysées dans les échantillons de sol sont représentés en surimposition.

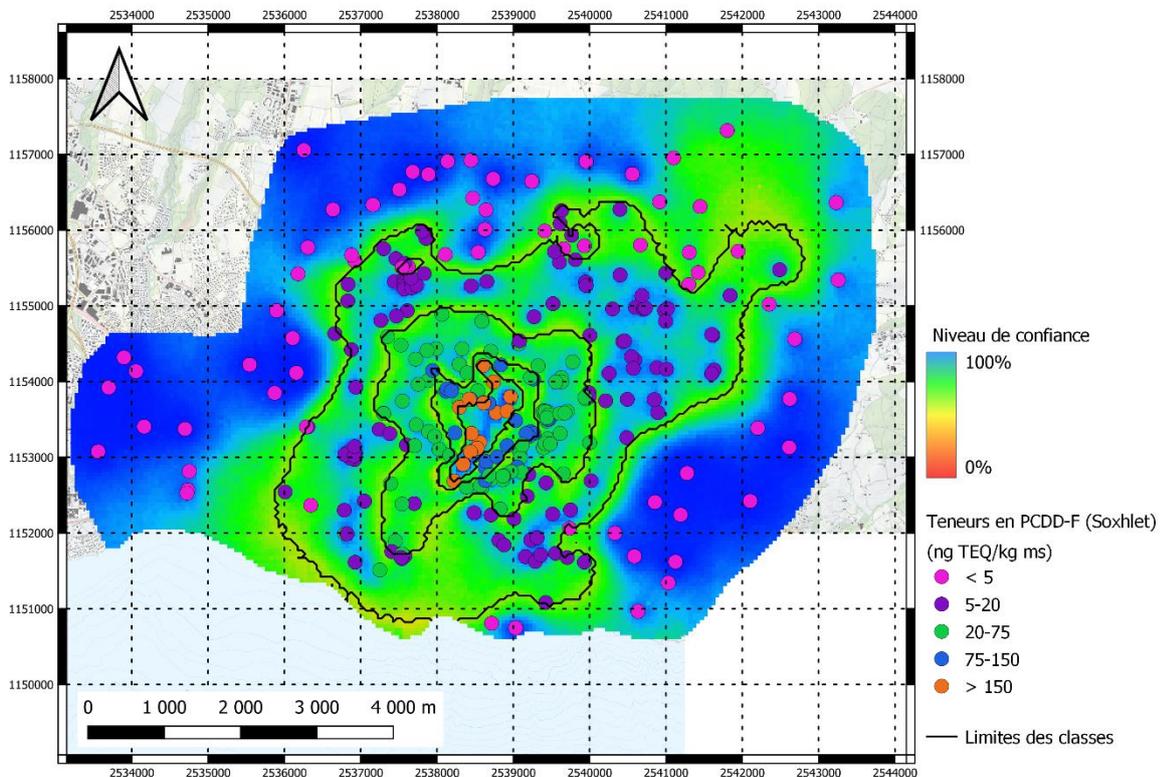


Figure 12 Carte des niveaux de confiance attribués à la classification des sols de la Figure 11. Résultat brut obtenu à partir de 1000 simulations de teneurs de bloc en PCDD-F extraction Soxhlet. Les niveaux de teneurs analysées dans les échantillons de sol et les limites de classe de la Figure 11 sont représentés en surimposition. Coordonnées en m dans le cadre de référence CH1903+/LV95.

7.2. Cartes publiées par l'Etat de Vaud

La carte brute de classification des sols la plus probable issue du traitement géostatistique des teneurs en PCDD-F Soxhlet (Figure 11) a été utilisée par l'Etat de Vaud pour établir deux cartes opérationnelles, présentées ci-dessous. Ces cartes sont publiées sur le géoportail <https://www.geo.vd.ch/>. Les niveaux de confiance à attribuer à ces cartes sont ceux représentés à la Figure 12.

7.2.1. Carte pour les besoins d'investigation et d'assainissement

La première carte délimite la zone dans laquelle des investigations sont requises au sens de l'Ordonnance sur les sites contaminés (OSites), pour évaluer les besoins d'investigation et d'assainissement des sols. Le périmètre de cette zone a été défini à partir de la limite à 20 ng TEQ Soxhlet / kg ms de la carte brute des classes de teneurs Soxhlet les plus probables (Figure 11). Le périmètre est une version simplifiée et sécuritaire de la limite à 20 ng TEQ Soxhlet / kg ms de la carte brute.

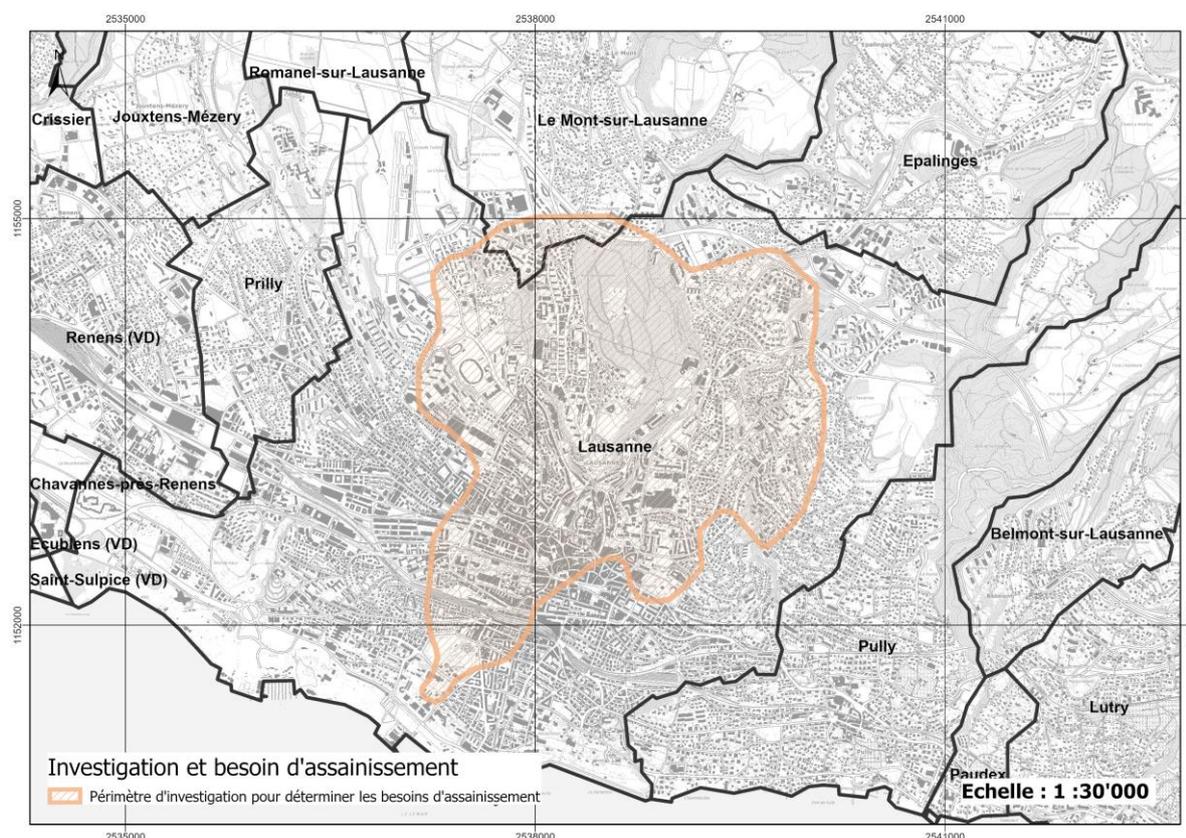


Figure 13 Carte du périmètre d'investigation pour déterminer les besoins d'assainissement publié par l'Etat de Vaud. Coordonnées en m dans le cadre de référence CH1903+/LV95.

7.2.2. Carte pour la gestion des matériaux terreux

La seconde carte délimite la zone dans laquelle des analyses de sol sont requises au sens de l'Ordonnance sur les sols (OSol) et de l'Ordonnance sur les déchets (OLED), pour déterminer les possibilités de valorisation ou de mise en décharge de matériaux terreux décapés lors de chantiers de construction. Le périmètre de cette zone correspond à la limite à 5 ng TEQ Soxhlet / kg ms de la carte brute des classes de teneurs Soxhlet les plus probables (Figure 11), qui a été lissée pour les besoins de la communication.

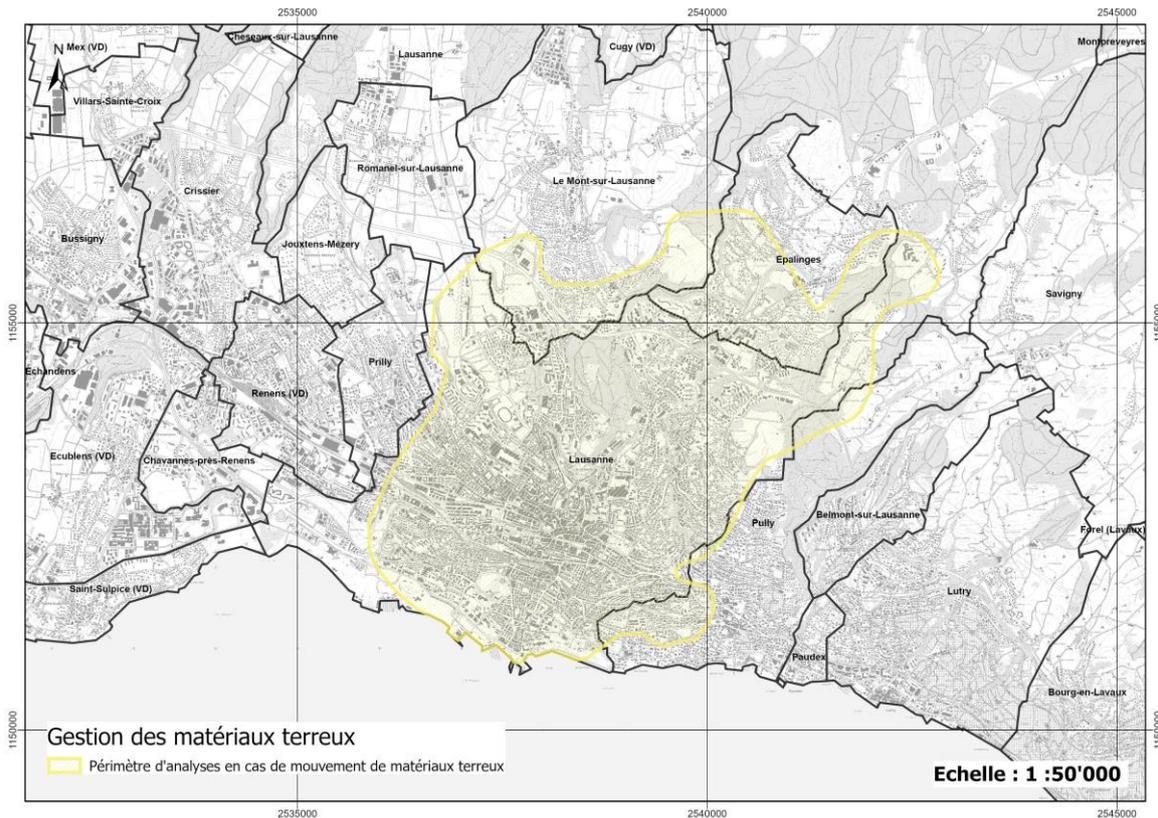


Figure 14 Carte du périmètre d'analyses en cas de mouvement de matériaux terreux publié par l'Etat de Vaud. Coordonnées en m dans le cadre de référence CH1903+/LV95.

8. Synthèse et recommandations

Les cartes de classification des sols produites à l'issue de ce travail représentent les intervalles de teneur en dioxines et furanes dans lesquels le niveau de pollution du sol a le plus de « chance » de se trouver dans chaque unité géographique constitutive du périmètre d'étude. Les cartes représentent donc un potentiel de pollution.

Deux cartes de classification ont été produites à partir des 304 échantillons de sol disponibles pour répondre aux exigences légales :

- La carte de classification des teneurs en PCDD-F correspondant à un protocole analytique avec extraction ASE, qui fournit les valeurs les plus élevées en dioxines et furanes ; la carte définit l'appartenance la plus probable aux classes < 5, 5 - 20, 20 – 50, 50 – 100, 100 – 200 et > 200 ng TEQ ASE / kg ms, et est utilisée pour établir la carte des recommandations sanitaires publiée par l'Etat de Vaud,
- La carte de classification des teneurs en PCDD-F correspondant à un protocole analytique avec extraction Soxhlet, qui fournit des valeurs plus faibles en dioxines et furanes ; la carte définit l'appartenance la plus probable aux classes < 5, 5 - 20, 20 – 75, 75 – 150 et > 150 ng TEQ Soxhlet / kg ms, et est utilisée pour établir la carte déterminant les besoins en investigation des sols, ainsi que celle précisant les mesures de gestion des sols décapés lors de chantiers, publiées par l'Etat de Vaud.

L'existence de deux cartes dont les résultats sont différents nécessite une vigilance particulière de la part des utilisateurs pour ne pas les confondre, et les utiliser à bon escient. Des changements dans la réglementation, p.ex. sur le type d'analyse ou le facteur de conversion ASE – Soxhlet pour appliquer les ordonnances concernées par cette pollution pourraient demander par ailleurs une adaptation des cartes.

La répartition des « classes de teneurs les plus probables » (ou potentiel de pollution) dans le périmètre d'étude reflète les tendances observées sur les données et ayant été intégrées à la modélisation : les teneurs diminuent alors que la distance de séparation avec le secteur du Vallon augmente, avec un effet marqué du relief et une dispersion plus grande dans la direction SW-NE des vents dominants qui complexifient la répartition de la pollution.

La lecture des cartes de classification est indissociable de celle des cartes des niveaux de confiance, qui indiquent la probabilité d'appartenir à l'intervalle de teneur attribué à chaque unité géographique, c'est-à-dire le niveau de précision (ou d'incertitude) avec lequel la classe a été attribuée. La classe de teneur n'est en effet connue avec une grande certitude que dans les parcelles dans lesquelles des échantillons de sol ont été prélevés et analysés au laboratoire. Le niveau de confiance a été estimé de manière rigoureuse par le modèle géostatistique, compte-tenu des données disponibles et de l'hétérogénéité de répartition de la pollution. Il intègre également l'existence d'une incertitude sur la représentativité des échantillons de sol et les analyses de laboratoire. Le niveau de confiance de la classification apparaît élevé en périphérie du domaine investigué et au cœur du secteur du Vallon, satisfaisant dans le reste du périmètre d'étude. Les classifications sont un peu plus incertaines dans les zones de transition entre les classes, ou bien dans les zones où la répartition de la pollution est plus hétérogène.

Les cartes fournissent une représentation conservatrice de l'état de pollution des sols aux dioxines et furanes, issue de la volonté de l'Etat de Vaud de définir des recommandations sanitaires et des mesures de gestion des sols sécuritaires. C'est dans cette optique que seuls les échantillons de sol représentatifs de sols anciens - qui n'ont très probablement pas été remaniés depuis l'arrêt des activités industrielles historiques du secteur du Vallon - ont été utilisés pour établir les cartographies des niveaux de pollution.

Les échantillons de sols de parcs, jardins et bois anciens ont donc été privilégiés. Les échantillons de sols qui auraient reçu des apports récents de terre ont été écartés du traitement géostatistique. De même, seuls les échantillons de surface – représentatifs des 5 à 20 premiers cm de sol – ont été conservés. C'est en effet sur la couche la plus superficielle de sol que les dépôts aériens de dioxines et furanes sont les plus importants. Les teneurs diminuent ensuite avec la profondeur. Le prélèvement d'échantillons de sol dans les parcelles permettra de vérifier leur niveau de pollution réel.

Ces cartes constituent le meilleur résultat qui pouvait être obtenu à partir des données collectées en 2021 et 2022, dont la position a été optimisée pour assurer un bon recouvrement du périmètre d'étude. Elles ont permis à l'Etat de Vaud de définir des mesures sanitaires et de gestion des sols par classe de teneurs à l'échelle de la région lausannoise. Ce travail pourrait néanmoins être complété en fonction des besoins futurs pour caractériser la pollution à petite échelle, ou pour définir des mesures supplémentaires de protection sanitaire et environnementale :

- Pour déterminer avec une plus grande certitude le niveau de pollution en dioxines et furanes, il sera nécessaire de prélever et analyser des échantillons de sol dans les unités géographiques d'intérêt (p.ex. parcelles). Les cartes géostatistiques actuelles de classification et de niveaux de confiance pourront alors être utilisées pour prioriser les campagnes de prélèvement, en privilégiant par exemple les parcelles dont les teneurs sont très probablement supérieures à la valeur d'assainissement OSol de 100 ng TEQ / kg ms pour les places de jeux ou jardins privés et familiaux, ou bien encore celles dont la classification est très incertaine,
- Les cartes de classification pourront être mises à jour au fur et à mesure de l'acquisition de nouvelles données, pour ajuster les limites de classe en fonction des nouvelles connaissances, et augmenter les niveaux de confiance sur l'ensemble du périmètre. La mise en relation des résultats cartographiques avec le parcellaire cadastral pourrait également faciliter ces mises à jour au moyen d'une base de données géoréférencée.

Neuchâtel, le 22 Décembre 2022



Hélène Demougeot-Renard
Directrice eOde



Baptiste Sauvaget
Collaborateur scientifique eOde

Bibliographie

- ADEME, 2018. Méthodologie de détermination des valeurs de fonds dans les sols : Echelle territoriale. Groupe de travail sur les valeurs de fonds.
- Berthet, A., Oltramare, C., Vernez, D., 2021. Contamination des sols aux dioxines/furanes en région lausannoise – Évaluation sanitaire. Centre universitaire de médecine générale et santé publique (Unisanté). <https://doi.org/10.16908/ISSN.1660-7104/325>
- Chilès, Jean-Paul, Delfiner, Pierre, 2012. Geostatistics. Modeling Spatial Uncertainty, Second edition. ed, Wiley series in probability and statistics.
- Cressie, Noel A., 1993. Statistics for spatial data, Revised edition. ed, Wiley series in probability and statistics.
- Demougeot-Renard, H., 2002. De la reconnaissance à la réhabilitation des sols industriels pollués: estimations géostatistiques pour une optimisation multicritère. Ecole Polytechnique Fédérale, Zürich, Suisse.
- Desnoyers, Y., 2010. Approche méthodologique pour la caractérisation géostatistique des contaminations radiologiques dans les installations nucléaires. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- eOde, 2022. Pollution des sols de Lausanne aux dioxines et furanes. Identification des sources possibles de pollution par une analyse statistique multivariée des données disponibles. Canton de Vaud.
- eOde, 2021. Pollution des sols de Lausanne aux dioxines et furanes. Cartographie géostatistique des classes de teneurs à partir de données collectées en 2021. Canton de Vaud.
- Goovaerts, P., 1997. Geostatistics for natural resources evaluation. Oxford university press.
- Jeanne, N., 2001. Caractérisation géostatistique de pollutions industrielles de sols: cas des hydrocarbures aromatiques polycycliques sur d'anciens sites de cokeries. Ecole des Mines de Paris.
- Krige, D.G., 1951. A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand. Journal of the chemical, metallurgical and mining society of South Africa.
- Lion, F., Aubert, N., Boissard, G., 2015. Définir une stratégie de dépollution : approche basée sur la masse de polluant et la capacité de relargage d'une pollution (Rapport final No. BRGM/RP-64350-FR). BRGM.
- Matheron, G., 1965. Les variables régionalisées et leur estimation: Une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature., Masson. ed. Paris.
- OFEV, 2021. Recommandations de l'OFEV concernant les analyses de dibenzodioxines et dibenzofuranes polychlorés ("dioxines", PCDD/F) dans les sols à Lausanne.
- OFEV, 2003. Prélèvement et préparation d'échantillons de sols pour l'analyse de substances polluantes. Manuel de prélèvement OSol. (Aide à l'exécution No. VU-4814-F). OFEV, Berne (CH).
- RECORD, 2016. Méthodes d'estimation et d'optimisation des quantités de terres polluées à traiter. Retour d'expérience sur la validité des estimations à partir de données réelles (No. 4-0515/1A).
- Sauvaget, B., 2019. Constitution de référentiels géochimiques locaux pour les sols et proches sous-sols urbains : de la base de données à l'interprétation géostatistique (Thèse de doctorat). Paris Sciences et Lettres, Paris.
- UPDS, 2016. Pollution concentrée - Définition, outils de caractérisation et intégration dans la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués.
- Vernez, D., Oltramare, C., Sauvaget, B., Demougeot-Renard, H., Aicher, L., Roth, N., Rossi, I., Radaelli, A., Lerch, S., Marolf, V., Berthet, A., 2023. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDDs) and dibenzofurans (PCDFs) soil contamination in Lausanne, Switzerland: Combining pollution mapping and human exposure assessment for targeted risk management. Environmental Pollution 316, 120441. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120441>

Lexique

Distribution	Répartition des valeurs mesurées d'un paramètre analytique en classes, auxquelles on associe la fréquence d'apparition, souvent représentée en histogramme
Loi gaussienne, loi normale	Loi de probabilité dépendant uniquement de 2 paramètres (moyenne, écart-type)
Outliers	Valeurs extrêmes des distributions
Percentile	Le percentile X désigne la valeur du paramètre analytique telle que X% de la population est inférieure à cette valeur (100 – X % lui est supérieure).
Population	Ensemble des individus (ici les points de prélèvements des sols) concernés par l'étude statistique et géostatistique
Support	En géostatistique, le support désigne la taille physique, caractérisée par une géométrie et une orientation, du volume sur lequel est mesurée la variable d'intérêt. Dans cette étude, le support désigne la hauteur de sol échantillonnée
Valeur de bloc p.ex. Teneur de bloc	Valeur moyenne de la variable d'intérêt dans un bloc, support de l'information, p.ex. Teneur moyenne en PCDD-F dans une maille de dimensions 2x2x1 m ³ .
Variable	Caractéristique, propriété (ici valeurs mesurées d'un paramètre analytique) de la population
Variable aléatoire	Les valeurs mesurées d'un paramètre analytique sont considérées comme des réalisations d'une variable aléatoire, définie par une loi de probabilité
Variogramme expérimental	Le variogramme expérimental permet de quantifier la variabilité de l'attribut étudié en fonction de la distance. Il est défini à partir des données comme la moyenne du demi-carré de l'écart entre les valeurs mesurées en 2 points, en fonction de la distance et de l'orientation séparant ces 2 points. Il est défini par : $\gamma(h) = \frac{1}{2} \frac{1}{n(\vec{h})} \sum_i \left(z(x_i + \vec{h}) - z(x_i) \right)^2$ avec : <ul style="list-style-type: none"> - $n(\vec{h})$, nombre de couples de points distants de \vec{h} - $\left(z(x_i + \vec{h}) - z(x_i) \right)^2$ écart quadratique des teneurs aux points x et $x + \vec{h}$ - $\frac{1}{n(\vec{h})} \sum_i \left(z(x_i + \vec{h}) - z(x_i) \right)^2$ moyenne de ces écarts quadratiques pour tous les couples de points distants de \vec{h} disponibles
Modèle de variogramme	Le variogramme expérimental n'est connu qu'à certaines distances et n'a pas les propriétés mathématiques requises pour la suite de la modélisation. Une fonction mathématique est donc ajustée au variogramme expérimental : le modèle de variogramme. Cette fonction fournit les valeurs du variogramme dans toutes les directions à toutes les distances. Cette étape constitue la transition des données expérimentales vers le modèle géostatistique.
Surface variographique	Egalement appelée carte variographique, elle représente une synthèse des résultats obtenus par le calcul de variogrammes expérimentaux dans toutes les directions. Elle permet d'identifier et d'étudier les anisotropies du milieu.

Figures

Figure 1 Carte de localisation des échantillons de sol utilisés pour cartographier les niveaux de pollution potentielle aux PCDD-F. Coordonnées en m dans le cadre de référence CH1903+/LV95. Teneurs en PCDD-F extraction ASE.....	11
Figure 2 Carte de répartition des teneurs en PCDD-F extraction Soxhlet dans les échantillons de sol utilisés pour cartographier les niveaux de pollution potentielle aux PCDD-F. Coordonnées en m dans le cadre de référence CH1903+/LV95.....	13
Figure 3 Vue 3D de la surface topographique dans le périmètre d'étude, et des teneurs en PCDD-F extraction ASE analysées dans les 304 échantillons de sol. Coordonnées en m dans le cadre de référence CH1903+/LV95. L'axe vertical est exagéré 3 fois.....	14
Figure 4 Diagramme représentant les teneurs en PCDD-F extraction ASE en fonction de la dérive combinant la distance au Vallon et la différence d'altitude entre les échantillons de sol et le point d'émission supposé des polluants (ρ : coefficient de corrélation linéaire entre les 2 variables, ligne rouge : loi de régression ajustée sur les données).....	14
Figure 5 Surface variographique (a) et variogramme (c) des teneurs en PCDD-F extraction ASE comparés à la rose des vents (b) d'une station météorologique proche du Vallon.....	15
Figure 6 Diagramme représentant les classes de teneurs en PCDD-F extraction ASE les plus probables (unité : ng TEQ ASE / kg ms) en fonction de leur niveau de confiance. Intervalles de teneurs définis par les seuils 5, 20, 50, 100 et 200 ng TEQ ASE / kg ms. La ligne noire représente l'espérance conditionnelle du niveau de confiance.	19
Figure 7 Carte de classification des sols dans les classes de teneurs en PCDD-F extraction ASE les plus probables. Résultat brut obtenu à partir de 1000 simulations de teneurs de bloc. Coordonnées en m dans le cadre de référence CH1903+/LV95. Les niveaux de teneurs analysées dans les échantillons de sol sont représentés en surimposition.....	20
Figure 8 Carte des niveaux de confiance attribués à la classification des sols de la Figure 7. Résultat brut obtenu à partir de 1000 simulations de teneurs de bloc en PCDD-F extraction ASE. Les niveaux de teneurs analysées dans les échantillons de sol et les limites de classe de la Figure 7 sont représentés en surimposition. Coordonnées en m dans le cadre de référence CH1903+/LV95.	20
Figure 9 Carte de recommandations sanitaires publiée par l'Etat de Vaud. Coordonnées en m dans le cadre de référence CH1903+/LV95.....	21
Figure 10 Diagramme représentant les classes de teneurs en PCDD-F extraction Soxhlet les plus probables (unité : ng TEQ / kg ms) en fonction de leur niveau de confiance. Intervalles de teneurs définis par les seuils 5, 20, 50, 75,100 et 150 ng TEQ / kg ms. La ligne noire représente l'espérance conditionnelle du niveau de confiance.	23
Figure 11 Carte de classification des sols dans les classes de teneurs en PCDD-F extraction Soxhlet les plus probables. Résultat brut obtenu à partir de 1000 simulations de teneurs de bloc. Coordonnées en m dans le cadre de référence CH1903+/LV95. Les niveaux de teneurs analysées dans les échantillons de sol sont représentés en surimposition.	24
Figure 12 Carte des niveaux de confiance attribués à la classification des sols de la Figure 11. Résultat brut obtenu à partir de 1000 simulations de teneurs de bloc en PCDD-F extraction Soxhlet. Les niveaux de teneurs analysées dans les échantillons de sol et les limites de classe de la Figure 11 sont représentés en surimposition. Coordonnées en m dans le cadre de référence CH1903+/LV95.	24
Figure 13 Carte du périmètre d'investigation pour déterminer les besoins d'assainissement publié par l'Etat de Vaud. Coordonnées en m dans le cadre de référence CH1903+/LV95.....	25
Figure 14 Carte du périmètre d'analyses en cas de mouvement de matériaux terreux publié par l'Etat de Vaud. Coordonnées en m dans le cadre de référence CH1903+/LV95.....	26
Figure 15 Corrélations entre les 17 variables initiales formées des ratios de congénères dans les 304 échantillons de sol, et les 2 premières composantes principales Dim 1 et Dim 2 de l'ACP – combinaisons linéaires des variables initiales résumant l'essentiel de leur variabilité. Le rayon 1 du cercle correspond à la corrélation maximale entre une variable initiale et une composante principale.....	41

Figure 16 Représentation graphique des résultats de CAH et ACP à partir des profils de congénères établis pour les 304 échantillons de sol (teneurs extraction ASE) disponibles en 2022. Les 5 groupes d'échantillons identifiés par CAH (a) sont différenciés par des couleurs dans le graphe des échantillons représentés dans l'espace des 2 premières composantes principales de l'ACP (b).....42

Figure 17 Représentation graphique des résultats de l'ACP à partir des profils de congénères établis pour les 304 échantillons de sol (teneurs extraction ASE), en différenciant les échantillons collectés en 2022 par une couleur rouge.43

Tableaux

Tableau 1 Congénères et TEF intervenant dans le calcul de la somme TEQ des teneurs en dioxines et furanes.	9
Tableau 2 Statistiques élémentaires des teneurs totales en PCDD-F analysées dans les 304 échantillons de sol de surface retenus pour la cartographie géostatistique des niveaux de pollution dans le périmètre d'étude. Un dégroupement a été appliqué pour réduire l'effet de grappes de données. Unité : ng TEQ / kg ms.	12
Tableau 4 Statistiques élémentaires des teneurs en PCDD-F extraction ASE analysées dans les 304 échantillons de sol de surface retenus pour la cartographie géostatistique des niveaux de pollution dans le périmètre d'étude (unité : ng TEQ / kg ms). Le dégroupement réduit l'effet de grappes de données.	45
Tableau 5 Statistiques élémentaires des teneurs en PCDD-F extraction Soxhlet analysées dans les 304 échantillons de sol de surface retenus pour la cartographie géostatistique des niveaux de pollution dans le périmètre d'étude (unité : ng TEQ / kg ms). Le dégroupement réduit l'effet de grappes de données.	45

Annexes

Annexe 1 Travaux réalisés et ressources mises en œuvre

Première étape – Mai à décembre 2021

<p>Mai – Juin 2021 : traitement des données des campagnes 1 et 2 d'échantillonnage et analyse des sols</p> <ul style="list-style-type: none"> • Préparation des données, import dans Isatis • Analyse statistique et variographique exploratoire • Diverses opérations de transformation, correction et construction de variables (dérive) • Construction d'une grille de calcul • Inférence variographique • Estimation des teneurs par krigeage avec dérive externe • Divers contrôles de validité et analyses de sensibilité • Cartographie des teneurs estimées par krigeage dans QGIS • Elaboration d'un plan d'échantillonnage optimisé pour la campagne 3 d'échantillonnage • Divers échanges avec la division GEODE et le bureau Impact Concept • Rédaction d'une note technique de présentation du plan d'échantillonnage proposé • Transmission de diverses figures et fichiers de résultats
<p>Juin – Juillet 2021 : traitement des données de la campagne 3 d'échantillonnage et analyse des sols</p> <ul style="list-style-type: none"> • Visioconférence de discussion des cartographies avec la division GEODE et le comité de suivi • Préparation des données, import dans Isatis • Récupération de géodonnées (cadastre, MNT) de l'Etat de Vaud, import • Analyse statistique et variographique exploratoire • Diverses opérations de transformation, correction et construction de variables (dérive) • Inférence variographique • Estimation des teneurs par krigeage avec dérive externe avec les données des 3 campagnes • Divers contrôles de validité et analyses de sensibilité • Cartographie des teneurs estimées par krigeage dans QGIS • Proposition de campagne 4 d'échantillonnage des sols pour combler les lacunes d'information se manifestant sur la carte des teneurs krigées et la carte des écarts-types de krigeage • Divers échanges avec la division GEODE et le bureau Impact Concept • Rédaction d'une note technique de présentation du plan d'échantillonnage 4 proposé • Transmission de diverses figures et fichiers de résultats
<p>Août – Sept 2021 : traitement des données de la campagne 4 d'échantillonnage et analyse des sols</p> <ul style="list-style-type: none"> • Préparation des données de la campagne 4 et des données d'autres études rassemblées par la commune de Lausanne et l'Etat de Vaud, import dans Isatis • Analyse statistique et variographique exploratoire • Diverses opérations de transformation, correction et construction de variables (dérive) • Inférence variographique • Génération de 1000 simulations conditionnelles des teneurs avec dérive externe avec la totalité des données disponibles • Divers contrôles de validité et analyses de sensibilité • Post-traitement des simulations pour produire des estimations des classes de teneurs les plus probables, calculer les probabilités de dépassement des seuils 20 et 100 ng TEQ / kg ms et les médianes des simulations • Cartographie des classes, probabilités d'appartenance aux classes, probabilités de dépassement des seuils et médianes dans QGIS • Transmission des résultats sous forme de fichiers sources, fichiers images et de notes techniques • Divers échanges avec la division GEODE et le comité de suivi (visioconférences) pour présenter les résultats, puis les ajuster • Reprise manuelle des cartes des QGIS pour simplifier les contours • Production de 7 séries de cartes selon les demandes de la division GEODE (classes de teneurs, échelles de couleur, données en surimposition ou pas, etc..)
<p>Novembre – Décembre 2021 : rédaction du rapport final</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rédaction d'un rapport final synthétique, intégration des demandes d'ajustement de la division GEODE, transmission sous format pdf.

Deuxième étape – Mars à novembre 2022

Mars – Mai 2022 : établissement d'un plan d'échantillonnage pour la campagne 5
<ul style="list-style-type: none"> • Analyse de l'influence du mélange des données extractions ASE/Soxhlet sur les cartographies • Etude des variations des teneurs avec la profondeur • Calcul de la dérive à partir du MNT sur le domaine élargi • Récupération et préparation des nouvelles données, ajout aux données déjà utilisées pour la cartographie 2021 • Sélection des données de surface de sols anciens non remaniés • Analyse statistique et géostatistique des données • Cartographie des probabilités de dépassement du seuil 5 et des teneurs, avec dérive externe • Etablissement d'un plan d'échantillonnage • Divers contrôles-qualité • Rédaction d'une note technique • Transmission du plan d'échantillonnage sous forme de divers fichiers (shapefile, csv, bmp) • Validation du plan d'échantillonnage adapté par Impact-Concept en fonction des contraintes de terrain
Juin – Sept 2022 : établissement des cartes à partir de toutes les données, y compris celles de la campagne 5 d'échantillonnage et analyse des sols
<ul style="list-style-type: none"> • Préparation des données pour cartographier les classes de teneurs ASE et Soxhlet • Préparation des données pour ACP • ACP pour identification d'éventuels échantillons anormaux • Analyse exploratoire et analyse variographique sur teneurs ASE et Soxhlet • Préparation de sélections des données anormales • Génération de simulations des teneurs extraction ASE et des teneurs extraction Soxhlet • Post-traitement des simulations pour cartographier les classes, pour différents jeux de seuils • Correction des cartes avec seuils incluant des décimales • Rédaction d'une note technique • Diverses réunions en visioconférence ou par téléphone avec le canton de Vaud • Transmission des résultats (fichiers shapefile, images, note technique)
Oct – Nov 2022 : rédaction du rapport final
<ul style="list-style-type: none"> • Rédaction d'un rapport final synthétisant le travail réalisé en 2021 et 2022, intégration des demandes d'ajustement du canton de Vaud, transmission sous format pdf.

Ressources

La modélisation géostatistique a été réalisée dans le logiciel de géostatistique Isatis développé et commercialisé par la société Geovariances. Les cartes ont été établies à partir des résultats de modélisation géostatistique d'Isatis, dans le logiciel QGis.

Le travail a été mené par Dr. Baptiste Sauvaget, consultant en géostatistique, avec la supervision de Dr. Hélène Demougeot-Renard, directrice et consultante en géostatistique.

Baptiste Sauvaget est titulaire d'une thèse de doctorat en géostatistique et géoingénierie de MinesParisTech, dédiée à la constitution de référentiels de la qualité chimique de sols urbains d'un quartier industriel de la ville de Nantes. Baptiste mène des études géostatistiques et statistiques de sites pollués et de sols urbains, participe à des groupes de travail sur les sols urbains, et contribue à la réalisation de projets de recherche et développement faisant intervenir des traitements géostatistiques et statistiques (p.ex. Cartorisk).

Hélène Demougeot-Renard est titulaire d'une thèse de doctorat en sciences naturelles de l'ETH Zürich, dédiée au développement d'une approche géostatistique pour estimer les volumes de sol et masses de polluants de sites pollués. Depuis plus de 20 ans, Hélène réalise des études géostatistiques de sites pollués et sols urbains pour cartographier l'état de pollution des milieux, effectuer des bilans de masse, ou bien encore optimiser les campagnes d'échantillonnage et de mesure. Hélène a également initié de nombreux projets de recherche et développement (p.ex. méthode Repérage de couplage de mesures sur site et de méthodes géostatistiques pour des cartographies optimisées, méthode Cartorisk de couplage de calculs de risques sanitaires et de modèles géostatistiques de pollutions pour des cartographies des risques sanitaires adaptées à des projets de reconversion de friches), et est impliquée dans divers groupes de travail sur les sols urbains, l'incertitude, etc...

Annexe 2 Synthèse des résultats de l'analyse statistique multivariée sur les profils de congénères des échantillons de sol

Après calcul des proportions des 17 congénères de dioxines et furanes dans les 304 échantillons de sol (échantillons analysés après une extraction ASE, ou bien échantillons analysés après une extraction Soxhlet convertis en valeurs ASE par application du facteur inverse de 42.5%), une analyse en composantes principales (ACP) et une classification ascendante hiérarchique (CAH) ont été menées de manière conjointe.

L'analyse en composantes principales (ACP) permet de résumer l'information portée par un grand nombre de variables – ici les 17 ratios de dioxines et furanes dans les 304 échantillons de sol – en un plus petit nombre de variables dénommées composantes principales. Les composantes principales sont des combinaisons linéaires des variables initiales. Elles sont décorrélées entre elles. En général, 2 ou 3 composantes principales suffisent pour résumer l'essentiel de la variabilité des variables d'origine. Ici, les 2 composantes principales Dim 1 et Dim 2 ont été retenues car elles résument 77.95% de la variabilité totale (Figure 15).

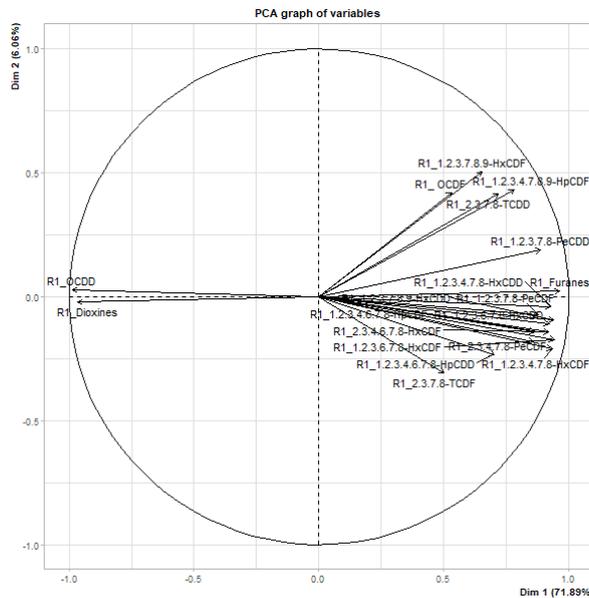


Figure 15 Corrélations entre les 17 variables initiales formées des ratios de congénères dans les 304 échantillons de sol, et les 2 premières composantes principales Dim 1 et Dim 2 de l'ACP – combinaisons linéaires des variables initiales résumant l'essentiel de leur variabilité. Le rayon 1 du cercle correspond à la corrélation maximale entre une variable initiale et une composante principale.

La classification ascendante hiérarchique (CAH) consiste à calculer une « distance » entre les échantillons exprimant la dissimilitude des 17 ratios. Les échantillons sont classés en groupes, en maximisant la distance entre les groupes et en minimisant la distance à l'intérieur de chaque groupe. Les résultats sont présentés sous forme d'un dendrogramme, représentant les regroupements des échantillons suivant cette distance.

L'analyse multivariée a été utilisée dans cette deuxième phase d'étude géostatistique, pour identifier d'éventuels échantillons nouvellement collectés, qui constitueraient des anomalies par-rapport au reste des données représentatives de « sols de surface anciens non remaniés ». Les échantillons de 2022 apparaissent en rouge dans le graphe des échantillons dans l'espace des 2 premières composantes principales de l'ACP (Figure 17). Ces échantillons ne se différencient pas des autres échantillons dans cet espace, ils n'apparaissent donc pas comme des anomalies, sur la base de leur profil de congénères. Ils n'ont donc pas été écartés des jeux de données utilisés pour cartographier les classes de teneurs en PCDD-F les plus probables.

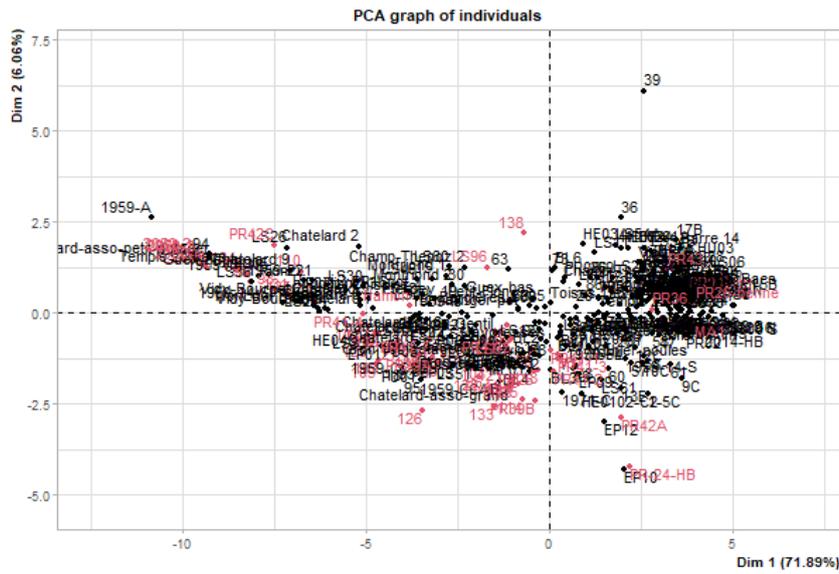


Figure 17 Représentation graphique des résultats de l'ACP à partir des profils de congénères établis pour les 304 échantillons de sol (teneurs extraction ASE), en différenciant les échantillons collectés en 2022 par une couleur rouge.

Annexe 3 Détail des méthodes et conditions de modélisation géostatistique

Liste des différentes étapes de traitement des données et modélisation

Le traitement des données ASE et Soxhlet est identique. Seuls les valeurs et les seuils changent pour obtenir les cartes de classification demandées par l'Etat de Vaud.

- Calcul de poids de dégroupement des données

N.B. : Bien que l'effet du dégroupement soit faible, ces poids ont été appliqués aux données dans la modélisation géostatistique dans un souci de fiabilité de l'estimation.

Tableau 3 Statistiques élémentaires des teneurs en PCDD-F extraction ASE analysées dans les 304 échantillons de sol de surface retenus pour la cartographie géostatistique des niveaux de pollution dans le périmètre d'étude (unité : ng TEQ / kg ms). Le dégroupement réduit l'effet de grappes de données.

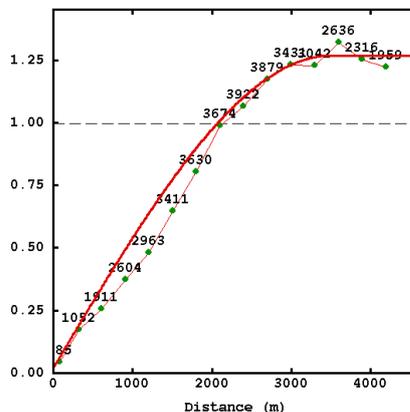
PCDD-F ASE	Nombre	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	P5%	Médiane	P95%
Non dégroupé	304	0.10	640.07	64.36	101.23	1.04	21.01	247.08
Dégroupé	304	0.10	640.07	63.75	101.61	1.04	21.01	246.01

Tableau 4 Statistiques élémentaires des teneurs en PCDD-F extraction Soxhlet analysées dans les 304 échantillons de sol de surface retenus pour la cartographie géostatistique des niveaux de pollution dans le périmètre d'étude (unité : ng TEQ / kg ms). Le dégroupement réduit l'effet de grappes de données.

PCDD-F Soxhlet	Nombre	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	P5%	Médiane	P95%
Non dégroupé	304	0.06	368.04	37.52	57.93	0.60	11.63	142.53
Dégroupé	304	0.06	368.04	36.72	58.51	0.60	11.63	141.46

- Elimination des duplicats du jeu de données
- Transformation de la distribution dissymétrique positive des données en distribution gaussienne par une fonction logarithme népérien et une anamorphose
- Contrôle-qualité par back-transformation des données, et comparaison aux données brutes
- Construction d'une dérive basée sur l'hypothèse de l'Usine du Vallon :

$$\text{Dérive} = \text{distance au vallon (point de référence : } X=2\ 538\ 678\ \text{m, } Y=1\ 153\ 260\ \text{m)} + (\text{altitude du point (m)} - \text{altitude de référence (610 m)})$$
- Calcul du coefficient de corrélation et ajustement d'une droite de régression entre les teneurs transformées en dioxines et furanes et la dérive
- Calcul d'une surface variographique pour analyser les anisotropies
- Calcul de variogrammes anisotropes et isotropes : un variogramme isotrope est retenu après divers tests de performance
- Ajustement du modèle de variogramme : Effet de pépite : 0.02, Sphérique : 1.25, portée : 3500 m



- Contrôle-qualité par validation croisée
- Construction d'une grille de calcul :

XMIN = 2 528 000 m	XMAX = 2 547 000 m	NX = 380	DX = 50 m
YMIN = 1 148 000 m	YMAX = 1 163 000 m	NY = 300	DY = 50 m

- Contrôle-qualité par calcul d'un krigeage de point avec dérive externe
- Génération de 1000 simulations conditionnelles de bloc (discrétisation : 2x2) avec dérive externe dans un voisinage unique, avec la méthode du krigeage ordinaire, seed : 423141
- Post-traitement des simulations :
 - Calcul des probabilités d'appartenance à chaque classe de teneurs
 - Attribution de la classe de plus grande probabilité