

Etat de Vaud

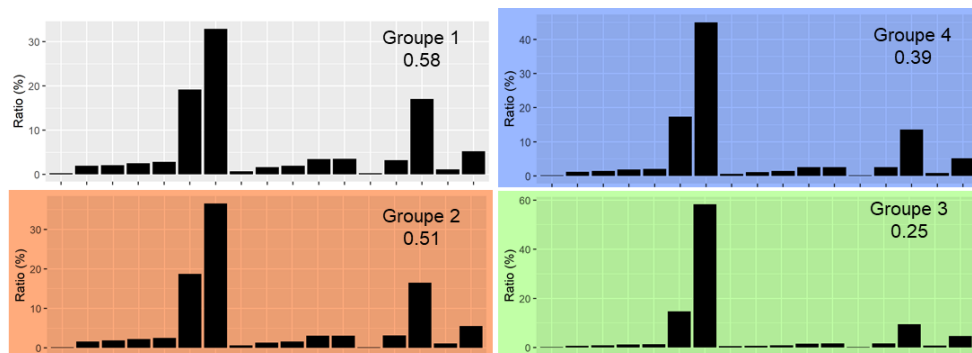
Direction générale de l'Environnement (DGE)
Direction de l'environnement industriel, urbain et rural (DIREV)
Chemin des Boveresses 155, CP133
CH-1066 Epalinges

Pollution des sols de Lausanne aux dioxines et furanes

Identification des sources possibles de pollution par une analyse statistique multivariée des données disponibles

Rapport final

Mars 2023, version révisée



Limites de responsabilités

L'étude statistique 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

Résumé	4
Abréviations	6
1. Contexte et objectifs	7
2. Eléments du problème.....	7
3. Méthodologie	10
3.1. Profils de dioxines et furanes.....	10
3.2. Facteurs explicatifs des profils.....	12
3.3. Analyse statistique exploratoire	12
4. Données utilisées	14
4.1. Données sur les sols	14
4.1.1. Echantillons de sol.....	14
4.1.2. Analyse des 17 congénères	14
4.1.3. Informations géographiques	16
4.2. Données sur les rejets de sources potentielles de pollution	16
5. Résultats.....	17
5.1. Identification de groupes d'échantillons de sol et facteurs de similitude et dissimilitude	17
5.1.1. Identification de groupes d'échantillons.....	17
5.1.2. Différenciation en fonction de la position par-rapport au Vallon.....	20
5.1.3. Profils moyens et indicateurs de pollution des groupes d'échantillons	21
5.1.4. Indicateur de pollution vs distance aux sources potentielles de pollution.....	22
5.2. Comparaison aux échantillons de rejets de sources potentielles de pollution	24
5.2.1. Profils de l'eau de rejet de l'usine du Vallon et des boues de la station d'épuration de Lausanne..	24
5.2.2. Position des échantillons de rejet par-rapport aux groupes d'échantillons de sol identifiés par l'analyse statistique multivariée	25
6. Conclusions	27
Bibliographie	28

Annexes

Annexe 1 Travaux réalisés et ressources mises en œuvre	33
Annexe 2 Détails sur les conditions de traitement statistique des données	36

Annexe informatique 1 Tableau excel des données dont l'analyse statistique est présentée dans ce rapport.

Résumé

En 2021, des teneurs élevées en dioxines et furanes découvertes dans les sols de Lausanne ont conduit l'Etat de Vaud à engager des campagnes de prélèvement et analyse de sols dans un large périmètre incluant la commune de Lausanne et les communes limitrophes d'Epalinges et du Mont-sur-Lausanne. Les résultats obtenus suggèrent une origine historique de la pollution, par les anciennes activités industrielles localisées dans le quartier du Vallon. Les polluants se seraient dispersés sous forme de gaz ou de poussières sous l'effet des vents à partir des points d'émission des usines. Par le passé, le Vallon était en effet occupé par de nombreuses fabriques, telles qu'une fonderie ou bien encore des ateliers de galvanoplastie et de chromage-nickelage, dont certaines ont potentiellement pu rejeter des dioxines et furanes.

L'état de Vaud suspecte 4 sources possibles à la pollution : l'ancien incinérateur (usine du Vallon), premier incinérateur suisse dont l'activité a démarré en 1958 et arrêté en 2005-2006 ; la centrale thermique de Pierre-de-Plan, en activité depuis 1901, l'ancienne décharge du Vallon et une éventuelle source proche du château, qui résulterait d'un incendie.

A la demande de la Direction de l'environnement industriel, urbain et rural (DIREV), le bureau eOde a réalisé entre Août et Novembre 2021 une analyse statistique multivariée des données disponibles, afin de déterminer l'origine possible de la pollution des sols, parmi ces 4 sources potentielles. Les approches statistiques font en effet partie des méthodes de forensie environnementale utilisées pour rechercher des preuves scientifiques de l'origine de pollutions (Bock et al., 2021; Cejas and Barrick, 2021; Götz, 1998; Götz and Lauer, 2003; Murphy and Morrison, 2015; Towey et al., 2010).

Les données traitées sont composées de 130 échantillons des 5 à 20 premiers cm de sols anciens non remaniés ; d'une analyse de 1996 d'eau de rejet de l'ancien incinérateur prélevée dans le trop plein de rinçage des cendres d'électrofiltres ; de 4 analyses de boues de la station d'épuration de Lausanne à Vidy réalisées en 1989, 1990, 1995 et 1998. Les teneurs en 17 congénères – 7 dioxines et 10 furanes – ont été analysées dans tous ces échantillons, permettant ainsi de calculer des profils sous forme de proportions de congénères, qui constituent une signature à la pollution. A ces informations fournies par la DIREV, ont été ajoutées des informations sur la position des échantillons de sol par-rapport au secteur du Vallon (distance, altitude, orientation), et plus précisément par-rapport à chacune des 4 sources potentielles de pollution.

Les informations ont été traitées dans leur ensemble par une analyse en composantes principales (ACP) et par une classification ascendante hiérarchique (CAH), afin de déterminer des groupes d'échantillons présentant des similitudes ou dissimilitudes. Des profils types des groupes d'échantillons ont ensuite été recherchés, ainsi que des facteurs explicatifs aux similitudes et dissimilitudes constatées.

Cette analyse multivariée met en évidence 4 groupes d'échantillons de sol se différenciant par leur profil, dont la répartition géographique est grossièrement concentrique par-rapport au secteur du Vallon. Les profils se différencient essentiellement par le rapport entre la proportion de 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD et la proportion d'OCDD, indicateur de la pollution qui diminue alors que la distance au Vallon augmente. Cet indicateur est utilisé pour étudier plus précisément la relation entre les profils des échantillons de sol et la distance aux 4 sources potentielles de pollution : cette relation apparaît plus faible entre les échantillons de sol et le château, qu'avec les 3 autres sources situées dans le Vallon.

L'analyse a été poursuivie en comparant les profils des échantillons de sol à ceux des rejets industriels et urbains retrouvés dans les archives. Le profil de l'eau de rejet de l'usine du Vallon de 1996 et ceux des boues de la station d'épuration de Lausanne prélevées entre 1989 et 1998 présentent des similitudes entre eux, mais apparaissent différents de ceux des échantillons de sol.

Ces résultats nous permettent de formuler les conclusions suivantes sur les origines de la pollution :

- L'existence d'une source majeure qui serait située en dehors de la zone du Vallon, dans le périmètre où le sol a été échantillonné, est très peu probable. Les profils de congénères en dioxines et furanes, qui constituent une signature à la pollution, se différencient en effet en fonction de la distance des échantillons de sol par-rapport au Vallon, relation qui ne pourrait pas être observée si les sources se trouvaient situées ailleurs que dans le Vallon,
- L'hypothèse d'une source qui serait située à proximité du château est écartée, car la relation entre l'indicateur de pollution - construit pour résumer la caractéristique dominante des profils - et la distance des échantillons de sol au château, apparaît plus faible que celle obtenue avec la distance aux 3 autres sources suspectées,
- La relation observée entre la distance au Vallon et les teneurs en dioxines et furanes dans les échantillons de sol, mais également avec les profils de congénères, indique que la ou les sources de pollution étaient localisées dans le Vallon. Mais la proximité géographique des 3 sources suspectées – usine du Vallon, usine Pierre-de-Plan et ancienne décharge du Vallon – rend difficile la différenciation de leurs effets possibles sur les sols, d'autant plus que seules des analyses représentatives des rejets de l'ancien incinérateur ont été retrouvées dans les archives (pas d'analyses représentatives des rejets de l'usine de Pierre-de-Plan ni de l'ancienne décharge),
- La dissimilitude du profil de l'analyse de 1996 de l'eau de rejet de l'usine du Vallon avec ceux des échantillons de sol ne permet pas d'attester une contribution de l'usine à la contamination des sols,
- Les analyses historiques (1989 à 1998) des boues de la station d'épuration de Lausanne à Vidy montrent des profils assez similaires à ceux calculés pour l'analyse d'eau de rejet de l'ancien incinérateur, mais différents de ceux des échantillons de sol du périmètre d'étude. Ces résultats suggèrent que l'ancien incinérateur pourrait avoir contribué à la pollution observée par le passé dans la station d'épuration.

Abréviations

ACP	Analyse en composantes principales
CAH	Classification ascendante hiérarchique
DGE	Direction générale de l'environnement
GEODE	Division géologie, sol et déchets
DIREV	Direction de l'environnement industriel, urbain et rural
LQ	Limite de quantification
OFEV	Office fédéral de l'environnement
HpCDD	Dioxines heptachlorées
HpCDF	Furanes heptachlorés
OCDD	Octachlorodibenzodioxine
OCDF	Octachlorodibenzofurane
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
Step	Station d'épuration des eaux
2,3,7,8-TCDD	2,3,7,8-Tétrachlorodibenzo-p-dioxine
TEF	Facteur d'équivalence toxique
TEQ	Equivalent toxique

1. Contexte et objectifs

En 2021, des teneurs élevées en dioxines et furanes découvertes dans les sols de Lausanne ont conduit l'Etat de Vaud à engager des campagnes de prélèvement et analyse de sols dans un large périmètre incluant la commune de Lausanne et les communes limitrophes d'Epalinges et du Mont-sur-Lausanne. Les résultats obtenus suggèrent une origine historique de la pollution, par les anciennes activités industrielles localisées dans le quartier du Vallon. Les polluants se seraient dispersés sous forme de gaz ou de poussières sous l'effet des vents à partir des points d'émission des usines. Par le passé, le Vallon était en effet occupé par de nombreuses fabriques, telles qu'une fonderie ou bien encore des ateliers de galvanoplastie et de chromage-nickelage, dont certaines ont potentiellement pu rejeter des dioxines et furanes.

L'Etat de Vaud souhaite préciser l'origine de cette pollution. Compte-tenu des informations contenues dans les archives, 4 sources de pollution sont suspectées par la Direction de l'environnement industriel, urbain et rural (DIREV) : l'ancienne usine d'incinération du Vallon (n° EVA 123.283), l'ancienne centrale thermique de Pierre-de-Plan (n° EVA 132.211) et l'ancienne décharge du Vallon, toutes 3 recensées dans le cadastre des sites pollués du canton, ainsi qu'une éventuelle source à proximité du château, qui résulterait d'un incendie.

En Août 2021, la DIREV a mandaté le bureau eOde pour mener une analyse statistique multivariée des données disponibles afin de déterminer l'origine possible de la pollution des sols, parmi ces 4 sources potentielles. Les approches statistiques font en effet partie des méthodes de forensie environnementale utilisées pour rechercher des preuves scientifiques de l'origine de pollutions (Bock et al., 2021; Cejas and Barrick, 2021; Götz, 1998; Götz and Lauer, 2003; Murphy and Morrison, 2015; Towey et al., 2010). Ce travail a été réalisé en parallèle à une expertise chimique conduite par la société Airmes, qui dispose d'une base de données d'analyses chimiques de dioxines et furanes d'un grand nombre d'installations industrielles suisses (Airmes, 2021).

Le présent rapport restitue les résultats de l'analyse statistique multivariée réalisée entre les mois d'Août et Novembre 2021. Ce rapport est la version révisée du rapport remis le 27 janvier 2022.

Le document précise les éléments du problème (chapitre 2), décrit la méthodologie appliquée (chapitre 3) ainsi que les caractéristiques des données utilisées (chapitre 4). Les résultats obtenus sont présentés au chapitre 5. Les conclusions pouvant être tirées sur les origines de la pollution sont fournies au chapitre 6.

Les travaux réalisés et les ressources mises en œuvre par le bureau eOde sont détaillés en **Annexe 1**.

2. Eléments du problème

La DIREV suspecte 4 sources de contamination des sols aux dioxines et furanes. Les informations fournies par la DIREV à leur sujet sont les suivantes :

- L'ancien incinérateur du Vallon (usine du Vallon), premier incinérateur suisse construit en 1954, a été mis en service en 1958 et arrêté en 2005-2006. Equipé de 2 fours et de 2 électrofiltres pour traiter les cendres volatiles, l'incinérateur brûlait environ 45000 tonnes d'ordures ménagères/an. La cheminée par laquelle s'échappait les gaz et les poussières avait une hauteur de 80 m. Des équipements ont été rajoutés progressivement pour limiter les rejets dans l'environnement (optimisation du traitement des cendres en 1960-1962, ajout d'un 3^{ème} électrofiltre en 1966, mise en service d'un lavage des fumées par voie humide avec rejet des eaux de lavage dans le réseau d'eaux usées en 1982, mise en conformité du traitement des cendres d'électrofiltres et boues résiduelles de lavage des fumées en 1997). Des dioxines et

furanes ont potentiellement pu être émises par voie aérienne dès 1958 par la cheminée ; par l'eau et les boues de lavage des fumées par voie humide dès 1982.

- La centrale thermique de Pierre-de-Plan (usine de Pierre-de-Plan), en activité de 1901 à aujourd'hui, était alimentée par du coke de 1934 à 1965, puis par du gaz naturel et de l'huile lourde jusqu'en 1990. Depuis 1990, le combustible utilisé est du mazout ultra léger. La cheminée de la centrale avait une hauteur initiale de 57 m, mais elle a été remplacée en 1977 par une cheminée de 80 m.
- L'ancienne décharge du Vallon a été exploitée entre 1950 et 1960 et renferme un volume de matériaux estimé à 1300000 m³.
- Les teneurs élevées en dioxines et furanes mesurées dans les sols à proximité du château font également suspecter une source dans ce secteur, peut-être en raison d'un incendie.

Les 3 premières activités se trouvaient dans le Vallon, tandis que le château occupe un promontoire au Sud du Vallon, comme indiqué sur la carte de la Figure 1. Les 4 sources potentielles sont situées dans la zone où les plus fortes teneurs en dioxines et furanes ont été mesurées dans les sols (teneurs en PCDD-F supérieures à 200 ng TEQ/kg ms).

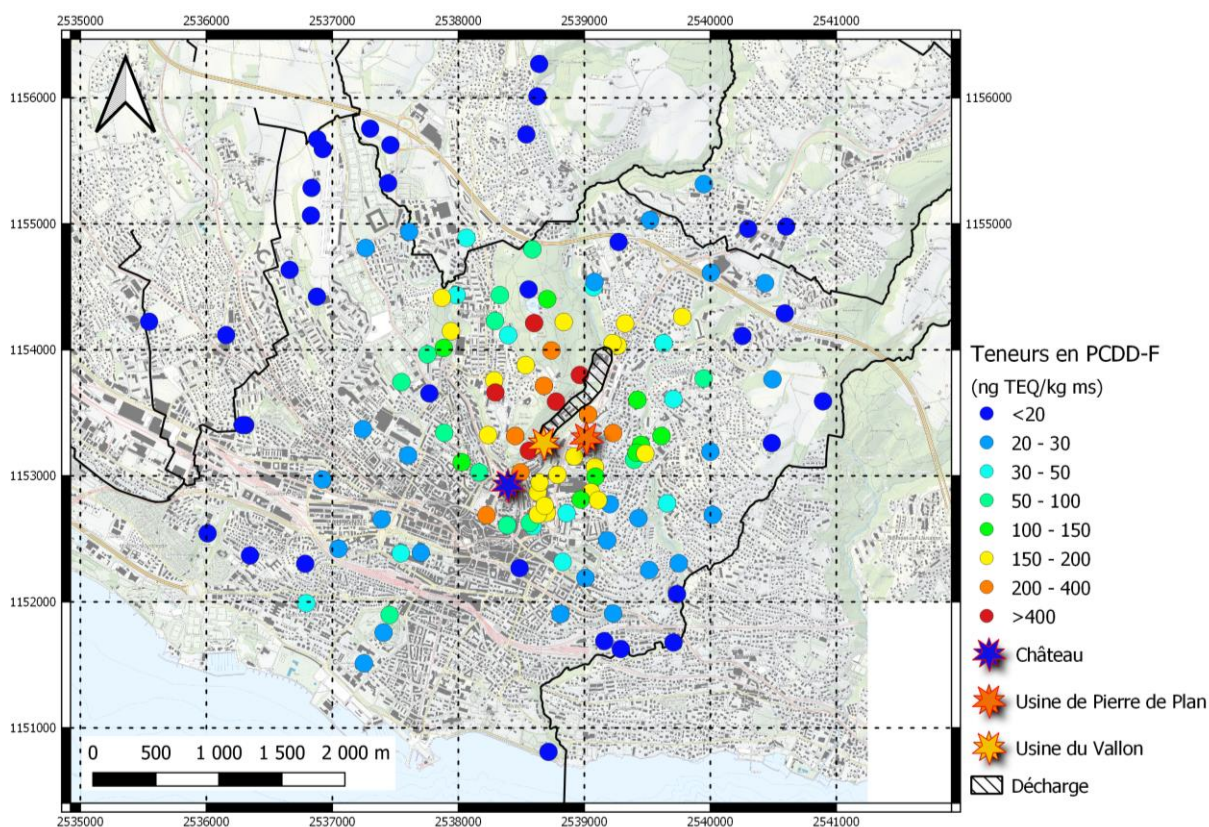


Figure 1 Carte de localisation des 4 sources potentielles de pollution et des 130 échantillons de sol utilisés dans la présente étude dans lesquels les dioxines et furanes ont été analysés. Coordonnées en m dans le cadre de référence CH1903+/LV95.

Les teneurs observées actuellement dans les sols peuvent résulter des apports d'une source unique, ou bien de plusieurs sources qui auraient rejeté les substances durant les mêmes périodes ou des périodes successives, et dans ce cas correspondre à un mélange de différentes provenances.

Compte-tenu des grandes distances auxquelles les dioxines et furanes ont été retrouvées dans les sols, il est probable que les substances se soient dispersées par voie aérienne sous forme gazeuse ou de poussières. La cartographie géostatistique établie par eOde pour le compte de l'Etat de Vaud témoigne

de l'impact conjugué des vents dominants et du relief dans la répartition de la pollution dans les sols, avec une diminution des teneurs alors que la distance au Vallon augmente (eOde, 2021).

Une dissémination par percolation d'eaux de rejet des usines ne peut néanmoins pas être exclue, car les documents d'archive révèlent que des dioxines et furanes avaient été détectés dans les eaux de rejet de l'ancien incinérateur en octobre 1996, ainsi que dans les boues de la station d'épuration de la commune de Lausanne à Vidy, qui recevait les eaux usées des installations du Vallon, en 1989, 1990, 1995 et 1998.

3. Méthodologie

La méthodologie appliquée consiste à rechercher des similitudes et dissimilitudes entre échantillons à partir des informations disponibles sur la pollution, et à déterminer des facteurs explicatifs en s'appuyant sur les outils de la statistique descriptive. Les détails techniques de l'analyse statistique multivariée sont fournis en **Annexe 2**.

3.1. Profils de dioxines et furanes

Un total de 17 substances – 7 dioxines et 10 furanes – sont le plus fréquemment analysées dans les échantillons d'air, d'eau ou de sol. Ces congénères sont présents dans les rejets d'activités industrielles et urbaines dans des proportions spécifiques – propres aux installations et procédés qui les ont produits. Les ratios des 17 congénères constituent ainsi une signature à la pollution aux dioxines et furanes.

Les profils de dioxines et furanes des échantillons de sol seront différents s'ils ont été soumis à l'influence de sources dont les profils se distinguent significativement. La Figure 2 montre par exemple le profil de congénères d'un sol sous l'influence d'un incinérateur en Espagne (a) (Nadal et al., 2002) et celui d'un sol soumis à l'effet de feux de bois brûlés sur un site industriel en France (b) (Denys et al., 2012). La teneur en OCDD est largement majoritaire (>60%) dans le premier profil, puis dans une moindre mesure celle en 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD, et en 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF et OCDF, ce qui n'est pas le cas dans le second.

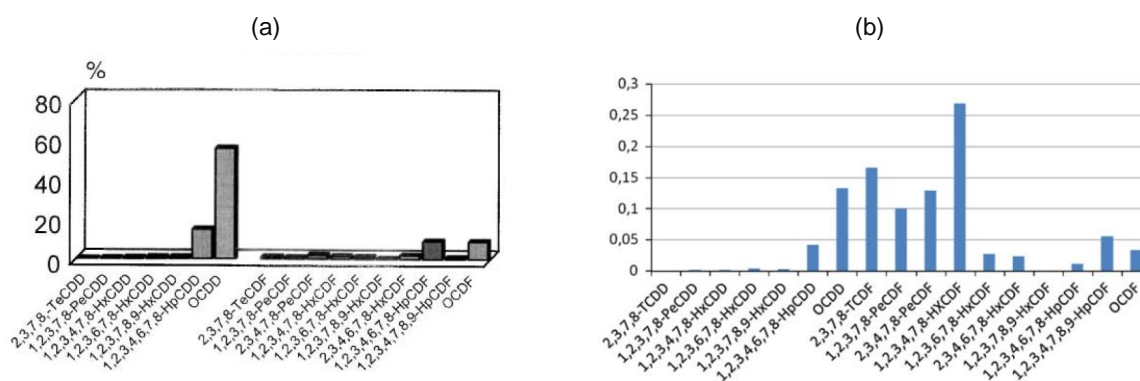


Figure 2 Profils de congénères mesurés dans des échantillons de sol sous l'influence d'un incinérateur (Nadal et al., 2002) (a) et de feux de bois sur un site industriel (Denys et al., 2012) (b). La proportion d'OCDD est largement dominante dans le profil (a), ce qui n'est pas le cas dans (b). Profil composé des proportions des teneurs en chacun des 17 congénères (ratio 1).

Les profils de dioxines et furanes ont donc été calculés dans les échantillons de sol et dans les rejets d'eau et de boues du périmètre d'étude à partir des analyses disponibles fournies par le canton. Pour chacun des échantillons, 4 types de profils classiquement rencontrés dans la littérature (cf. p.ex. (Fiedler et al., 1996; Shields et al., 1964)) ont été établis :

- Ratio 1 : rapport entre la teneur en 1 congénère et la teneur totale des 17 congénères,
- Ratio 2 : rapport entre la teneur en 1 congénère et la somme des teneurs de la série de composés homologues,
- Ratio 3 : rapport entre la teneur en 1 congénère pondéré par son facteur de toxicité, et la teneur totale des 17 congénères en équivalents toxiques,
- Ratio 4 : rapport entre la somme des teneurs de la série de composés homologues et la teneur totale des 17 congénères.

Les ratios 1 à 3 fournissent des profils à 17 proportions. Le ratio 4 fournit des profils à 10 proportions. A titre d'illustration, les 4 profils obtenus avec l'analyse de l'échantillon de sol n°49 prélevé dans le périmètre d'étude sont représentés à la Figure 3.

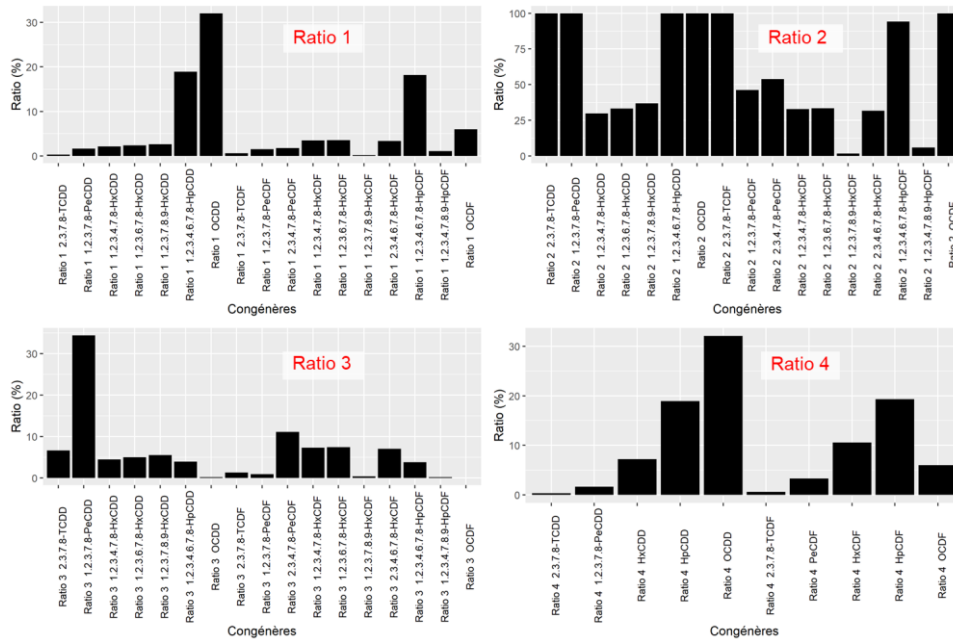


Figure 3 4 profils de congénères calculés pour l'échantillon de sol n°49 à partir des teneurs en dioxines et furanes analysées au laboratoire.

Les facteurs d'équivalence toxique (TEF) appliqués aux congénères dans le calcul du ratio 3 sont précisés dans le Tableau 1. Ce sont ceux recommandés par l'Organisation mondiale de la santé en 2005. Ces facteurs tiennent compte du degré de toxicité de chaque congénère par rapport au 2,3,7,8-TCDD, auquel une valeur de 1 a été attribuée. La somme des dioxines et furanes exprimée en équivalent toxique (TEQ) correspond à la somme des teneurs auxquelles le TEF a été appliqué.

Tableau 1 Congénères et TEF intervenant dans le calcul de la somme TEQ des teneurs en dioxines et furanes, et des proportions de congénères du ratio 3.

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
Furanes	2,3,7,8-TCDF	0.1
	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

3.2. Facteurs explicatifs des profils

La différenciation des échantillons de sol par l'origine de leur contamination en fonction des profils de congénères peut être complexe (cf. p.ex. (Meneses et al., 2004; Oh et al., 2006; Schuhmacher and Domingo, 2006)), car :

- Les sols peuvent être soumis à l'influence de plusieurs sources, de sorte que le profil observé dans les sols résulte du mélange des apports de ces sources,
- Les sources peuvent avoir des profils très similaires,
- Des phénomènes interviennent entre le point de rejet des sources et le point de dépôt dans le sol, qui modifient les proportions initiales de congénères, et peuvent rendre difficile leur mise en relation avec les proportions finales dans les sols,
- Des phénomènes interviennent dans les sols une fois les dioxines et furanes déposés (p.ex. lixiviation, bioturbation), de sorte que les proportions de congénères au moment du dépôt sont encore modifiées.

Nous avons donc intégré à notre analyse, d'autres données qui étaient disponibles et pourraient constituer des facteurs explicatifs aux profils observés dans les échantillons. Il s'agit essentiellement d'informations géographiques renseignant sur la position relative des échantillons de sol par-rapport au secteur du Vallon (distance, altitude, orientation).

D'autres informations pourraient être utiles à la compréhension de l'origine de la pollution des sols, mais n'étaient pas disponibles, ou bien n'étaient renseignées que sur un trop petit nombre d'échantillons pour pouvoir être utilisées dans l'analyse statistique. Les teneurs en métaux (Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg, Zn, Mo), en fluor et en composés organiques (HAP, BAP, PCB) ont par exemple été analysées dans les sols, mais sur seulement 15 échantillons. Une relation pourrait exister entre les teneurs en métaux et les teneurs en dioxines et furanes, si ces dernières proviennent par exemple d'une fonderie ou d'un site sidérurgique (cf. p.ex. (Zhou et al., 2019)). Les propriétés des sols, telles que la teneur en gravier, le pourcentage de matière organique ou le pH peuvent également influencer les proportions, en favorisant l'accumulation ou le lessivage préférentiel de certains congénères par exemple (Bodéan and Garrido, 2004). Mais ces propriétés ont été mesurées sur un trop petit nombre d'échantillons (20).

3.3. Analyse statistique exploratoire

L'analyse statistique consiste à identifier des similitudes ou dissimilitudes entre échantillons, qui pourraient provenir de l'origine différente de leur contamination, à partir des données disponibles en chacun des échantillons. Des outils de la statistique descriptive sont utilisés à cet effet.

Les échantillons sont nombreux – 130 échantillons de sol et 5 échantillons de rejets historiques – et les variables attribuées aux échantillons tout autant – 17 teneurs en congénères et ratios associés, auxquels ont été rajoutés 4 variables géographiques décrivant la position relative des échantillons par-rapport au Vallon. La recherche des similitudes et dissimilitudes nécessite donc des statistiques multivariées, qui permettent de déterminer des tendances en présence d'un grand nombre d'informations. Deux méthodes ont été appliquées aux données de manière conjointe : une analyse en composantes principales (ACP) et une classification ascendante hiérarchique (CAH). Ces statistiques multivariées constituent la première étape d'analyse des données.

Des statistiques univariées et bivariées ont été calculées dans une deuxième étape, une fois que des groupes d'échantillons ont été identifiés. Ces calculs consistent par exemple à établir des profils moyens de groupes d'échantillons ou des nuages de corrélation entre 2 variables qui permettent de caractériser les différences ou similitudes, et d'étudier les facteurs explicatifs à ces regroupements.

Ce traitement itératif en 2 phases – schématisé à la Figure 4 - a été répété dans différentes configurations, pour différentes sélections de variables et échantillons de sol. Les calculs ont aussi été réalisés : en intégrant la totalité des échantillons de sol disponibles, ou bien en ne sélectionnant que les échantillons de « sols anciens non remaniés » de surface ; en utilisant les ratios 1, 2, 3 ou 4 pour caractériser les profils ; en intégrant ou pas les informations géographiques dans les ACP et CAH ; en

substituant les teneurs inférieures à la limite de quantification (LQ) par la moitié de la LQ, ou par 0, ou par la LQ (Aldea et al., 2016).

Les résultats présentés dans le rapport sont ceux obtenus avec les ratios 1, pour les « sols anciens non remaniés » de surface, en substituant les teneurs inférieures à la limite de quantification (LQ) par la moitié de la LQ, et en excluant les informations géographiques des ACP et CAH. Ces résultats reflètent les tendances majoritaires observées dans les différentes configurations testées.

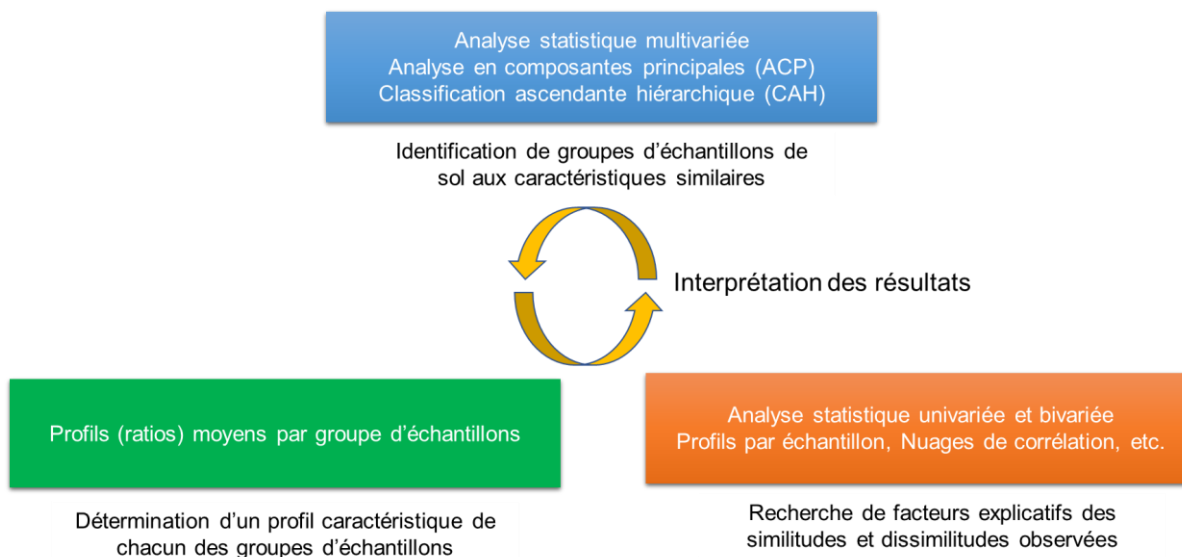


Figure 4 Représentation schématique de l'analyse statistique itérative appliquée aux données disponibles sur la pollution des sols de Lausanne aux dioxines et furanes.

4. Données utilisées

4.1. Données sur les sols

4.1.1. Echantillons de sol

Les 130 échantillons de sol utilisés pour l'analyse statistique multivariée sont constitués de « sols anciens non remaniés ». Ce sont des sols qui ont pu être soumis à l'effet d'émissions de dioxines et furanes par des activités historiques, mais sans que leurs teneurs aient été significativement modifiées par des interventions telles que des excavations ou des apports de nouvelles terres par exemple.

La plus grande partie des échantillons a été prélevée par le bureau Impact Concept lors de 4 campagnes d'investigation organisées en 2021. Une autre partie est issue d'autres études rassemblées par le canton de Vaud et la ville de Lausanne.

Conformément aux recommandations du manuel (OFEV, 2003) sur le prélèvement de sols, les échantillons prélevés lors des campagnes de 2021 sont des composites, correspondant au mélange de sols prélevés par des sondages à la tarière (5 à 16 piqûres en général) dans une zone ou une placette positionnée dans les parcelles. Les échantillons sont prélevés dans les 5 à 20 premiers centimètres (sols de surface) dans des zones enherbées de parcs, jardins ou forêts. Les échantillons provenant des autres études remplissent également les mêmes consignes de prélèvement.

Les 130 échantillons correspondent aux 126 échantillons utilisés pour établir la cartographie géostatistique des niveaux de pollution des sols publiée par l'Etat de Vaud à l'automne 2021 (eOde, 2021), auxquels s'ajoutent 4 échantillons qui avaient été écartés de l'étude géostatistique, car ils introduisaient une hétérogénéité dégradant la représentation cartographique de l'état de pollution des sols dans le périmètre d'étude (Figure 1).

4.1.2. Analyse des 17 congénères

Chacun des échantillons de sol a donné lieu à l'analyse des 17 congénères de dioxines et furanes réglementés dans l'ordonnance sur les sols (OSol). Les analyses des échantillons prélevés par Impact Concept ont été réalisées par le laboratoire Scitec.

Les statistiques élémentaires (Tableau 2) calculées sur les 130 échantillons – représentées sous forme de boîtes à moustaches à la Figure 5 – montrent que les teneurs en octachlorodibenzodioxine (OCDD) sont en moyenne les plus élevées des 17 congénères (654 ng/kg ms), puis par ordre d'importance décroissante les dioxines heptachlorées 2.3.4.6.7.8-HpCDD (360 ng/kg ms) et les furanes heptachlorés 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF (324 ng/kg ms). La somme des teneurs en dioxines (7 congénères) (1191 ng/kg ms) apparaît également supérieure en moyenne à celle des teneurs en furanes (10 congénères) (730 ng/kg ms).

Les teneurs en congénères ont été utilisées pour calculer des profils sous forme de proportions de congénères ou séries d'homologues (ratios) pour tous les échantillons, tels que présentés à la Figure 3 pour l'échantillon n°49.

Tableau 2 Statistiques élémentaires des teneurs en congénères, teneurs totales en dioxines, teneurs totales en furanes, et teneurs totales en dioxines et furanes (PCDD-F) analysées dans les 130 échantillons de sol retenus pour l'analyse statistique multivariée (unité : ng/kg ms).

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	P5%	P25%	Médiane	P75%	P95%
2,3,7,8-TCDD	0.5	31	4	6	0.5	0.5	2	6	19
1,2,3,7,8-PeCDD	0.5	251	35	48	2	6	17	47	135
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.5	276	39	51	2	8	20	51	152
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.5	312	46	59	4	10	23	59	167
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.5	363	52	68	3	10	27	68	210
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	8	2270	360	438	37	88	193	469	1355
OCDD	54	4070	654	719	95	223	378	812	2207
Total dioxines	72	6791	1191	1381	146	351	649	1547	4257
2,3,7,8-TCDF	0.5	88	12	16	1.5	3	6	15	39
1,2,3,7,8-PeCDF	0.5	219	29	39	2	6	15	38	108
2,3,4,7,8-PeCDF	0.5	253	35	46	3	7	18	44	129
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.5	437	64	83	5	13	34	78	238
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.5	455	64	84	5	14	34	81	25
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.5	27	4	5	0.5	0.5	2	5	15
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.5	406	60	79	5	14	33	76	219
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	4	2270	324	422	25	73	167	411	1214
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	1.5	265	23	35	1.5	5	11	26	93
OCDF	5	1490	114	180	11	26	54	129	502
Total furanes	14	5357	730	962	61	163	385	923	2748
Total PCDD-F	90	12112	1921	2339	212	507	1032	2478	6998

PX% : Percentile X%.

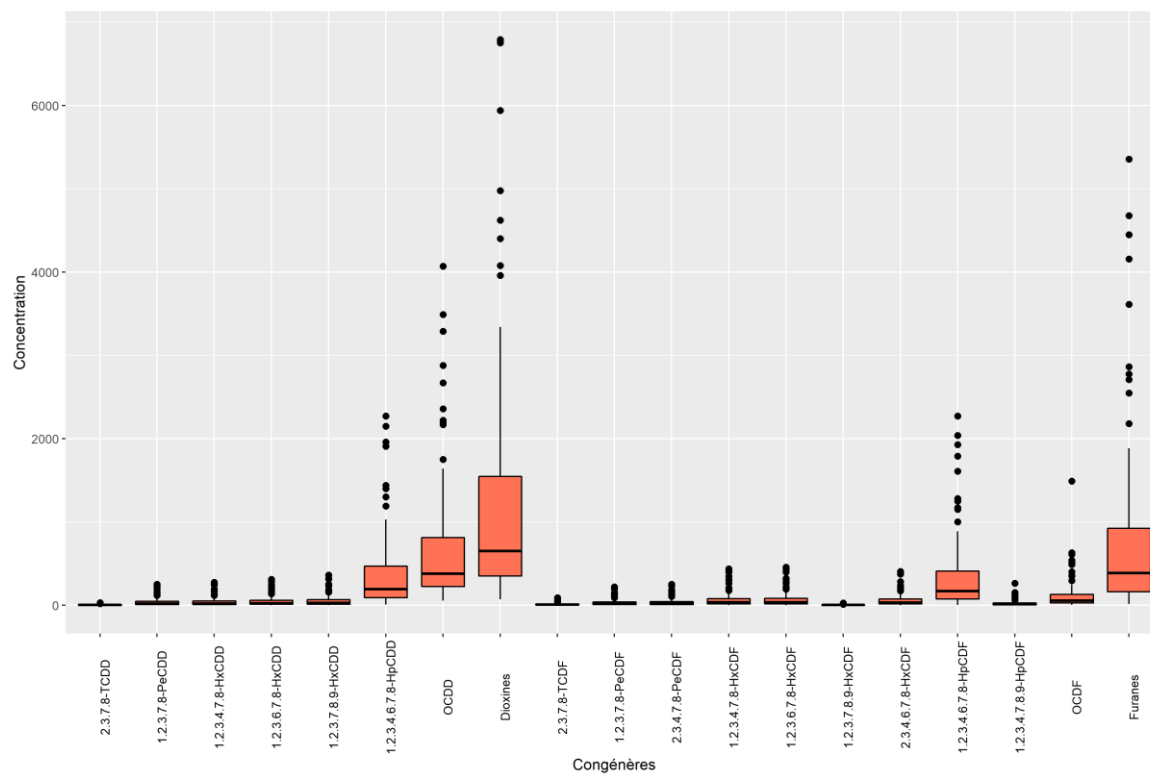


Figure 5 Statistiques élémentaires représentées sous forme de boxplots (boîtes à moustaches) des teneurs en congénères, teneurs totales en dioxines, teneurs totales en furanes, et teneurs totales en dioxines et furanes (PCDD-F) analysées dans les 130 échantillons de sol retenus pour l'analyse statistique multivariée (unité : ng/kg ms).

4.1.3. Informations géographiques

Pour chacun des 130 échantillons de sol, les variables géographiques suivantes ont été calculées :

- Distance entre le point d'échantillonnage et la source potentielle de pollution,
- Différence d'altitude entre le point d'échantillonnage et celle du point d'émission supposé de la source de pollution,
- Angle par-rapport au Nord de la ligne joignant la source au point de prélèvement,
- Dérive utilisée dans le modèle géostatistique de répartition spatiale de la pollution combinant la distance à la source et la différence d'altitude (cf. Figure 3, p.10 du rapport (eOde, 2021)).

4.2. Données sur les rejets de sources potentielles de pollution

Une analyse d'eau de rejet de l'ancien incinérateur a été réalisée sur un échantillon prélevé le 27 août 1996 par le Service des eaux et de la protection de l'environnement de l'Etat de Vaud. L'échantillon a été prélevé dans le trop plein de rinçage des cendres d'électrofiltres, et les analyses réalisées par le laboratoire Innolab, comme indiqué dans le document d'archive fourni par la DIREV (fichier 1996_Courrier analyse rejet UIOM + Notes internes.pdf). Le résultat est exprimé en ng/L et en ng/kg ms. La teneur totale en dioxines et furanes s'élève à 5870 ng/L (Tableau 3).

Les dioxines et furanes ont également été analysés dans les boues de la station d'épuration (Step) de Lausanne à Vidy en 1989, 1990, 1995 et 1998, comme résumé dans le rapport De Lucas de 1998 fourni par la DIREV. Les eaux de rejet de l'ancien incinérateur étaient évacuées vers la station d'épuration de Vidy. Les teneurs en dioxines et furanes analysées dans les boues de la Step sont élevées, mais diminuent de 65234 à 9814 ng/ kg ms entre 1990 et 1998 (teneurs totales divisées par 7, cf. Tableau 3).

Tableau 3 Teneurs en dioxines et furanes mesurées dans un échantillon d'eau de rejet de l'ancien incinérateur en 1996 et dans 4 échantillons de boues de la station d'épuration de Lausanne entre 1989 et 1998.

	Eau de rejet 96		Step89	Step90	Step95	Step98
	ng/L	ng/kg ms	ng/kg ms	ng/kg ms	ng/kg ms	ng/kg ms
2,3,7,8-TCDD	4	1400	34	54	77	4
1,2,3,7,8-PeCDD	30	12000	230	480	670	71
1,2,3,4,7,8-HxCDD	46	18700	550	720	810	242
1,2,3,6,7,8-HxCDD	54	21700	340	820	970	124
1,2,3,7,8,9-HxCDD	63	25500	410	1000	1700	136
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	429	173200	8200	9900	5000	1510
OCDD	740	299000	26000	27000	5400	3323
Total dioxines	1368	551500	35764	39974	14627	5410
2,3,7,8-TCDF	8	3300	160	160	290	21
1,2,3,7,8-PeCDF	30	12000	660	470	500	61
2,3,4,7,8-PeCDF	47	18900	520	680	870	111
1,2,3,4,7,8-HxCDF	90	36300	900	1500	3700	264
1,2,3,6,7,8-HxCDF	76	30800	930	1400	2400	319
1,2,3,7,8,9-HxCDF	6	2400	200	550	1600	23
2,3,4,6,7,8-HxCDF	113	45400	1800	2000	130	414
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	531	214100	6800	9000	5300	1741
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	68	27300	800	1000	1300	265
OCDF	598	240000	8200	8500	3600	1185
Total furanes	1569	630500	20970	25260	19690	4404
Total PCDD-F	5870	1182000	56734	65234	34317	9814

5. Résultats

Les résultats présentés ici sont ceux obtenus avec les ratios 1 des dioxines et furanes – rapports entre les teneurs en congénères et les teneurs totales en dioxines et furanes - en substituant les teneurs inférieures à la limite de quantification (LQ) par la moitié de la LQ. Le tableau correspondant à ce jeu de données se trouve en **Annexe informatique 1** du rapport.

5.1. Identification de groupes d'échantillons de sol et facteurs de similitude et dissimilitude

5.1.1. Identification de groupes d'échantillons

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 130 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 décorréélées 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 68.56% de la variabilité totale (cf. Figure 6).

Les échantillons de sol peuvent être représentés dans l'espace des 2 premières composantes, leurs coordonnées sont alors leurs contributions (pondérations) à chacune des composantes (Figure 7 (a)). Cette représentation permet d'identifier les groupes d'échantillons qui présentent des similitudes en fonction de leurs 17 ratios 1 de congénères. Des groupes d'échantillons apparaissent, qui se différencient surtout par leur contribution à la première composante. Quelques échantillons sont isolés, comme le n°39.

Une classification ascendante hiérarchique (CAH) a été menée en parallèle à l'ACP sur le même jeu d'échantillons et de variables. Cette méthode consiste à calculer une « distance » entre les échantillons exprimant la dissimilitude des 17 ratios 1. 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. La classification permet d'identifier 5 groupes d'échantillons de sol (Figure 7 (b)).

Les groupes d'échantillons identifiés par la CAH sont différenciés par une couleur dans le graphe des résultats de l'ACP. Les résultats des 2 méthodes apparaissent cohérents : l'échantillon n°39 se différenciant des autres échantillons par l'ACP se distingue aussi par la CAH et constitue un unique groupe (groupe 5). Les 4 autres groupes produits par la CAH – dénommés groupes 1 à 4 - se différencient par l'importance de leur contribution à la première composante principale de l'ACP.

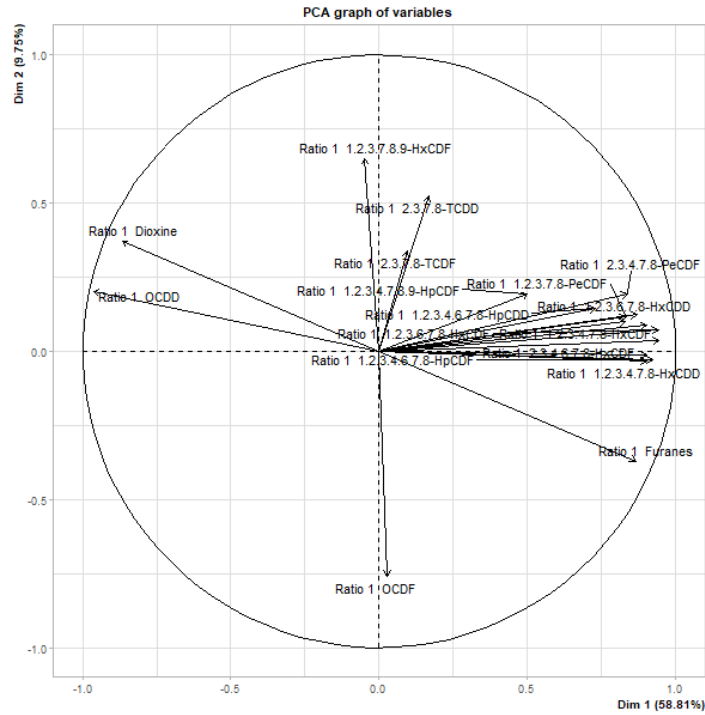


Figure 6 Corrélations entre les 17 variables initiales formées des ratios 1 de congénères dans les 130 échantillons de sol, et les 2 premières composantes principales Dim 1 et Dim 2 de l'ACP – combinaisons linéaires des variables initiales résumant l'essentiel de leur variabilité. Le rayon 1 du cercle correspond à la corrélation maximale entre une variable initiale et une composante principale.

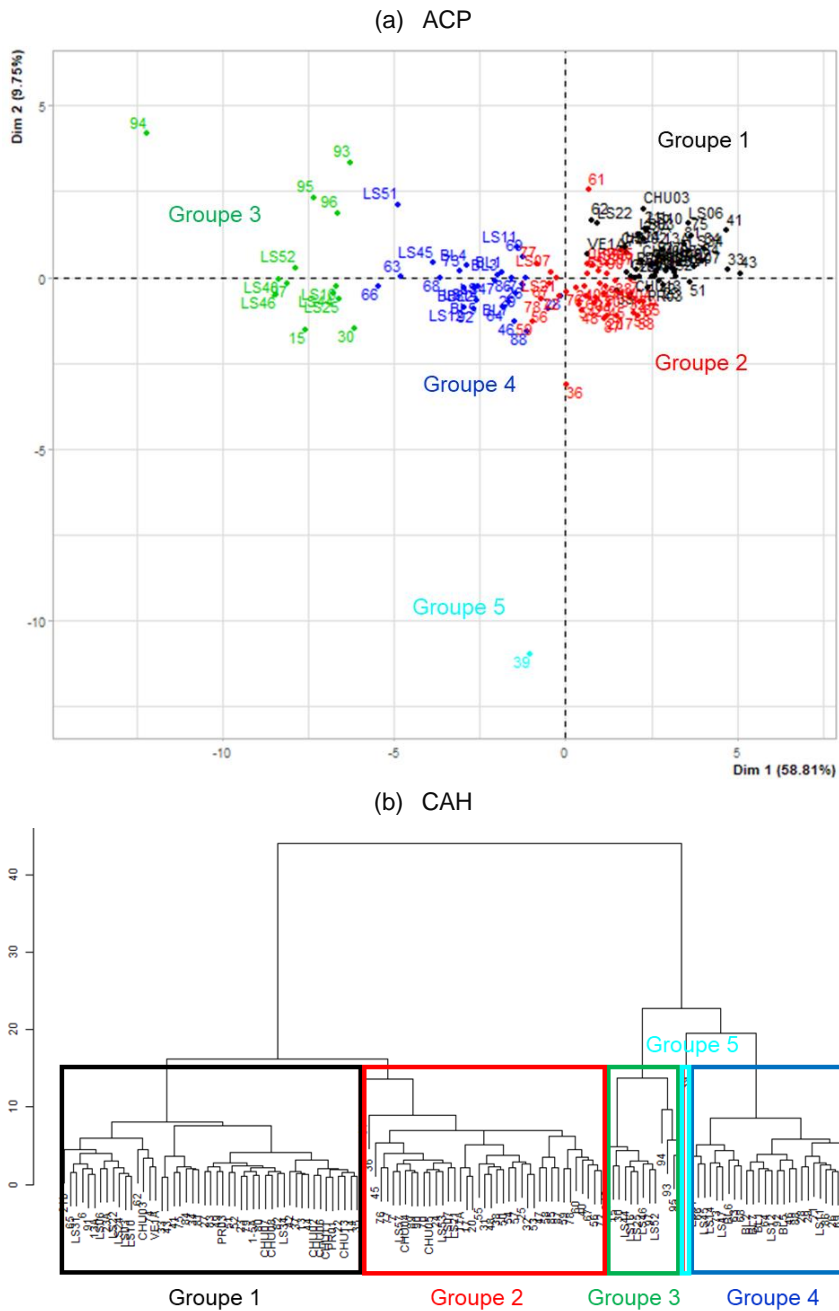


Figure 7 Groupes d'échantillons de sol identifiés par la combinaison d'une analyse en composantes principales (ACP) et d'une classification ascendante hiérarchique (CAH) appliquées aux ratios 1 des 130 échantillons de sol. (a) Echantillons de sol représentés dans l'espace des 2 premières composantes principales de l'ACP, (b) Dendrogramme représentant les regroupements des échantillons obtenus par la classification ascendante hiérarchique (CAH).

5.1.2. Différenciation en fonction de la position par-rapport au Vallon

Si 5 groupes d'échantillons se différencient, se pose alors la question des facteurs explicatifs de leurs similitudes et dissimilitudes, et notamment de la contribution à leur profil des sources de pollution potentielles localisées dans le secteur du Vallon ou à proximité du château. Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à la localisation de ces groupes dans le périmètre d'étude. La carte de la Figure 8 représente la localisation des échantillons par groupes dans le périmètre, selon le même code couleur que celui utilisé pour présenter les résultats d'ACP et CAH à la Figure 7. Les groupes apparaissent répartis de manière grossièrement concentrique par-rapport au secteur du Vallon, avec le groupe 1 (noir) dans son environnement le plus proche, puis le groupe 2 (rouge), 4 (bleu) et 3 (vert) à mesure que la distance par-rapport au Vallon augmente. Seul le groupe 5 formé de l'unique échantillon n°39 ne semble pas présenter de relation avec la distance au Vallon.

La répartition des groupes apparaît ainsi tout à fait cohérente avec la répartition spatiale des teneurs en dioxines et furanes modélisée par (eOde, 2021), et notamment avec la distribution des classes de teneurs les plus probables cartographiées sous forme de fond de plan à la Figure 8. Comme les teneurs en PCDD-F, la répartition des groupes ne semble pas suivre une relation simplement inversement proportionnelle à la distance de séparation du Vallon : d'autres facteurs interviennent, dont l'effet du relief et de l'anisotropie des vents, qui complexifie la répartition.

Ces résultats indiquent que les différences entre groupes – qui ont été trouvées exclusivement à partir des 17 ratios de congénères puisque seules ces informations ont été utilisées dans l'ACP et la CAH – sont reliées à la position des points d'échantillonnage par-rapport au Vallon.

Ils suggèrent en outre que la probabilité pour qu'une source de pollution majeure soit située en dehors du Vallon est très faible. Si tel était le cas, les groupes d'échantillons similaires identifiés par les statistiques multivariées (ACP et CAH) ne montreraient pas cette relation géographique forte avec le secteur du Vallon.

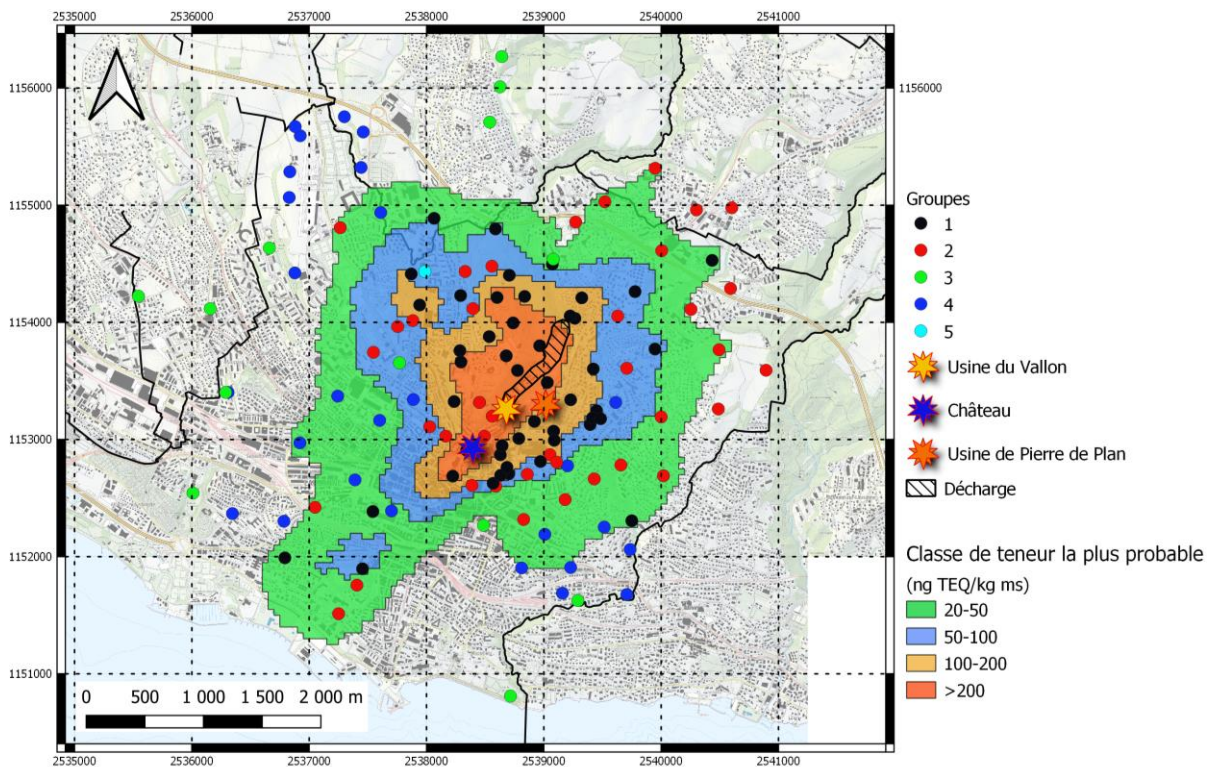


Figure 8 Carte de localisation des 130 échantillons de sol par groupes identifiés par CAH, superposés à la classification des sols la plus probable obtenue par l'étude géostatistique (eOde, 2021). Coordonnées en m dans le cadre de référence CH1903+/LV95.

5.1.3. Profils moyens et indicateurs de pollution des groupes d'échantillons

Les résultats précédents laissent penser que les 5 groupes d'échantillons ont des profils différenciés, puisque ce sont les 17 ratios 1 qui sont à l'origine de leur différenciation par l'ACP et la CAH. Des profils moyens ont donc été calculés à partir de la moyenne de chacune des 17 proportions de congénères des échantillons dans les groupes. Les profils obtenus pour les groupes 1 à 4 sont visuellement très similaires, avec une proportion majoritaire d'OCDD, puis dans une moindre mesure de 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD et de 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF.

On remarque néanmoins que la différence entre la proportion d'OCDD et celle de 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD s'accroît entre le groupe 1 et le groupe 3, à mesure que la distance des groupes d'échantillons par rapport au Vallon augmente. Cette caractéristique permet de calculer un indicateur de la pollution aux dioxines et furanes – sous forme du rapport entre le pourcentage de 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD et le pourcentage d'OCDD - qui résume la caractéristique marquante du profil moyen de chacun des groupes. Ce rapport diminue du groupe 1 au groupe 3, passant de la valeur 0.58 à 0.25 (Figure 9).

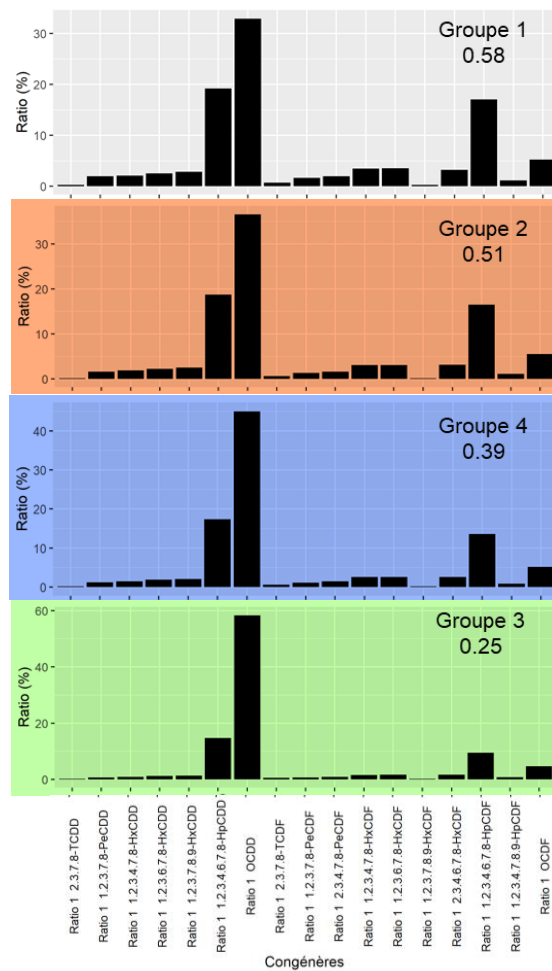


Figure 9 Profils moyens calculés pour les groupes d'échantillons de sol 1 à 4 différenciés par les statistiques multivariées ACP et CAH, classés de haut en bas par distance décroissante par rapport au Vallon (cf. carte Figure 8). Le nombre indiqué sur les figures correspond à l'indicateur de pollution, rapport entre la proportion de 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD et celle d'OCDD.

Le profil du groupe 5 correspond à celui de l'unique échantillon n°39 (Figure 10). Ce profil est très différent de ceux représentés à la Figure 9, avec une proportion majoritaire de OCDF, puis dans une moindre mesure d'OCDD et de 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD. Le contraste très net de profil suggère une erreur analytique dans l'échantillon n°39, ou bien l'intervention d'un phénomène qui a profondément modifié le contenu de l'échantillon en dioxines et furanes.

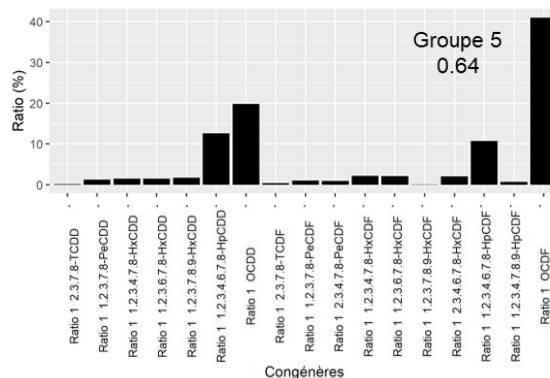


Figure 10 Profil moyen calculé pour le groupe 5 constitué de l'unique échantillon de sol n°39 différencié par les statistiques multivariées ACP et CAH (Figure 8). Le nombre indiqué sur la figure correspond à l'indicateur de pollution, rapport entre la proportion de 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD et celle d'OCDD.

5.1.4. Indicateur de pollution vs distance aux sources potentielles de pollution

L'indicateur de pollution formé du rapport entre les ratios en 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD et OCDD permet de résumer en une seule variable la différence majeure entre les profils d'échantillons. Il est alors possible d'analyser la relation entre les profils de pollution et la position relative des échantillons par-rapport aux sources de pollution suspectées : pour chacune des 4 sources, un nuage de corrélation entre l'indicateur de pollution des échantillons et la distance que les sépare de la source est tracé. Le coefficient de corrélation linéaire est calculé et une droite de régression est ajustée sur le nuage de points. On obtient ainsi 4 graphes, correspondant aux 4 sources potentielles de pollution (Figure 11).

Les corrélations sont négatives, reflétant la relation inversement proportionnelle entre l'indicateur de pollution et la distance à la source déjà observée sur les groupes d'échantillons (cf. § 5.1.3) : le rapport entre ratios diminue alors que la distance augmente. La plus faible corrélation (-0.45) est mesurée entre les échantillons de sol et la source suspectée à proximité du château (Figure 11(a)). Les corrélations mesurées avec les 3 sources du Vallon - ancien incinérateur, ancienne usine Pierre-de-Plan et ancienne décharge - sont quant à elles très proches l'une de l'autre, avec des coefficients de corrélation allant de -0.63 à -0.68.

Ces résultats nous indiquent que la pollution observée dans les sols a peu de « chance » de provenir d'une source qui serait située près du château. L'hypothèse d'un apport par un incendie qui se serait tenu dans ce secteur est donc rejetée.

Les relations entre la pollution mesurée dans les sols et la distance aux 3 autres sources sont significatives, mais très peu différentes les unes et des autres. Ces relations géographiques ne permettent donc pas de différencier leur contribution respective à la pollution constatée dans les sols.

Remarque : des conclusions similaires ont été obtenues en étudiant les relations entre les indicateurs de pollution et la dérive, fonction intégrant la relation avec la distance et le relief utilisée pour établir la cartographie géostatistique des niveaux de pollution.

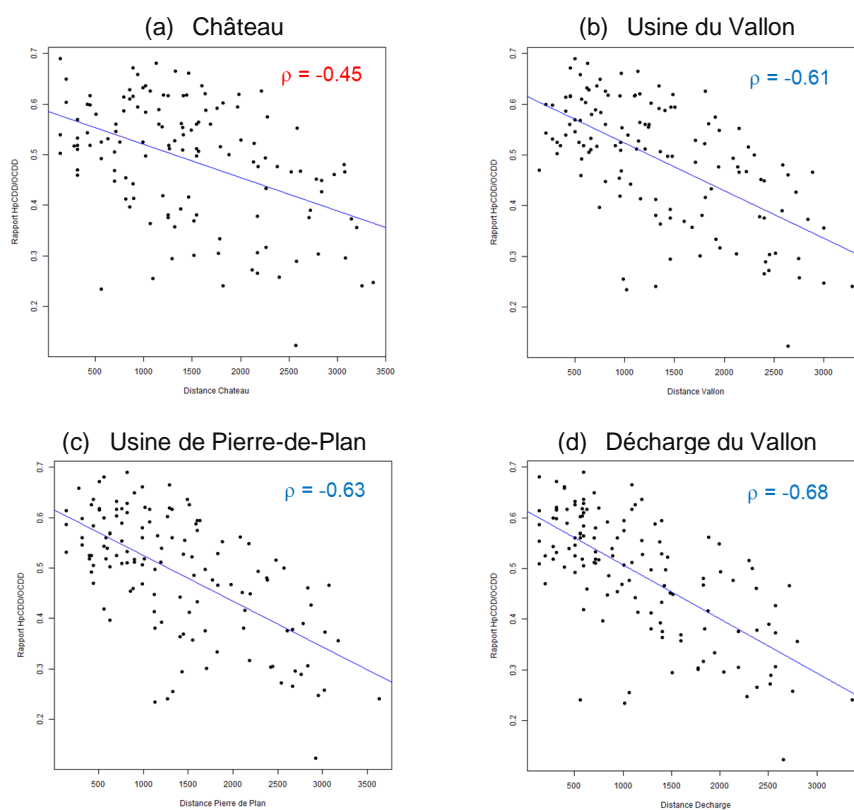


Figure 11 Nuages de corrélation entre l'indicateur de pollution aux dioxines et furanes (rapport entre le pourcentage de 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD et le pourcentage d'OCDD) et la distance à la source de pollution calculé pour les 4 sources suspectées. ρ indique le coefficient de corrélation linéaire, la ligne bleue est la droite de régression ajustée aux données.

5.2. Comparaison aux échantillons de rejets de sources potentielles de pollution

L'analyse statistique menée sur les échantillons de sol, leurs profils de congénères et leur position géographique par-rapport au Vallon permet d'écarter l'hypothèse de sources majeures de pollution en dehors du secteur du Vallon. Le château et son environnement proche sont exclus des sources possibles. La contribution des 3 sources potentielles du Vallon n'a en revanche pas été déterminée. L'analyse statistique est donc poursuivie en intégrant les résultats d'analyse disponibles sur les rejets des industries du Vallon.

5.2.1. Profils de l'eau de rejet de l'usine du Vallon et des boues de la station d'épuration de Lausanne

L'analyse d'eau de rejet de l'ancien incinérateur de 1996 a été utilisée pour calculer un profil de congénères, selon la même méthode que celle appliquée aux échantillons de sol (ratio 1). Visuellement, la première partie de son profil (Figure 12) ressemble à celle des profils moyens des groupes 1 à 4 d'échantillons de sol (Figure 9), avec une prédominance des dioxines OCDD et 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD. L'indicateur de pollution formé du rapport entre le pourcentage de 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD et le pourcentage d'OCDD (0.58) est de fait égal à celui établi pour le groupe 1 d'échantillons de sol situés très près du secteur du Vallon. La deuxième partie du profil diffère néanmoins des profils moyens des échantillons de sol : les furanes 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF et OCDF sont en proportions importantes dans l'eau de rejet, avec une prédominance d'OCDF ; dans les groupes d'échantillons de sol, ce sont les furanes 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF qui sont prédominants par-rapport aux OCDF.

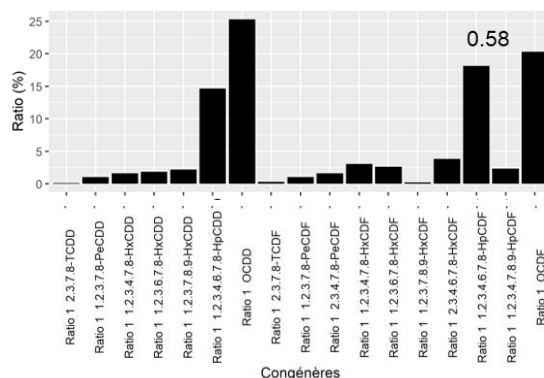


Figure 12 Profil (ratio 1) calculé pour l'analyse d'eau de rejet de l'ancien incinérateur prélevée le 27 août 1996. Le nombre indiqué sur la figure correspond à l'indicateur de pollution, rapport entre la proportion de 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD et celle d'OCDD.

De la même façon, les ratios 1 ont été calculés pour les 4 échantillons de boue de la station d'épuration de Lausanne à Vidy, prélevés en 1989, 1990, 1995 et 1998 (Figure 13).

Le profil de l'échantillon de boue de 1995 apparaît très différent des profils des autres échantillons de boue, de l'analyse d'eau de rejet de l'usine du Vallon, et des échantillons de sol, y compris de l'échantillon isolé n°39. L'indicateur de pollution (0.95) de cet échantillon se distingue aussi nettement.

Les échantillons de boue de 1989, 1990 et 1998 présentent des profils visuellement similaires, avec une prédominance des dioxines OCDD et 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD, puis des furanes 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF et OCDF. Les proportions relatives de ces 2 furanes varient en fonction des échantillons, avec davantage d'OCDF dans l'analyse de boue de 1989 (comme observé dans l'eau de rejet), mais au contraire autant ou plus d'1,2,3,4,6,7,8-HpCDF dans les analyses de 1990 et 1998 (de manière similaire à ce qui est observé dans les sols). L'indicateur de pollution calculé sur les profils des analyses de boue augmente de 0.32 à 0.45 de 1989 à 1998 ; il apparaît assez proche de celui calculé pour les échantillons

de sol du groupe 4 (0.39). Mais cet indicateur ne résume ici qu'imparfaitement le profil de congénères, puisqu'il n'intègre pas la proportion importante d'OCDF par exemple.

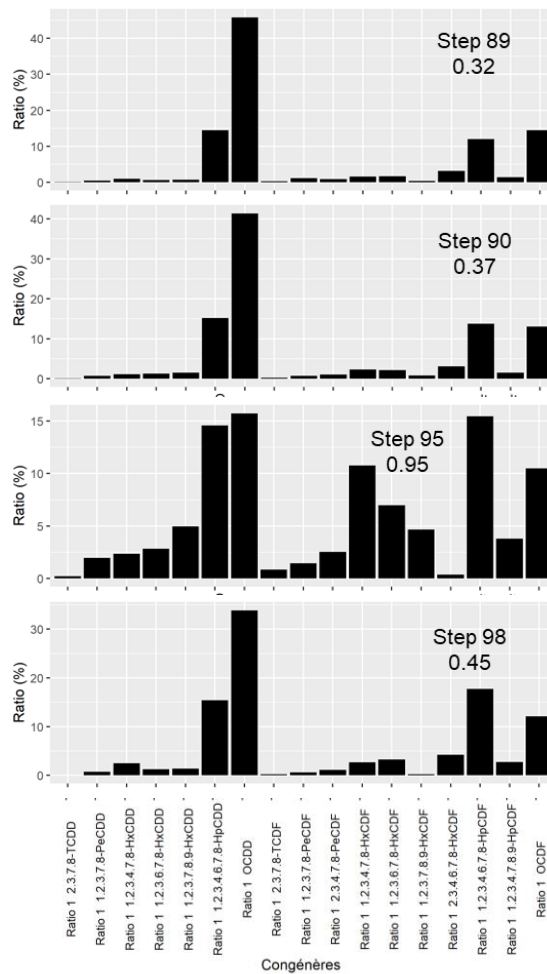


Figure 13 Profils (ratios 1) calculés pour les analyses de boue de la station d'épuration de Lausanne à Vidy. Le nombre indiqué sur les figures correspond à l'indicateur de pollution, rapport entre la proportion de 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD et celle d'OCDD.

5.2.2. Position des échantillons de rejet par-rapport aux groupes d'échantillons de sol identifiés par l'analyse statistique multivariée

Pour compléter cette comparaison, les ratios 1 de l'analyse de l'eau de rejet et des analyses des boues de la station d'épuration ont été ajoutés à ceux des 130 échantillons de sol, puis l'analyse en composantes principales (ACP) et la classification ascendante hiérarchique (CAH) ont été répétées (Figure 14). L'introduction de ces résultats redistribue légèrement les échantillons de sol dans les groupes, mais leur répartition en 5 groupes est néanmoins confirmée.

L'échantillon d'eau de rejet de l'ancien incinérateur, les 3 échantillons de boue prélevés en 1989, 1990 et 1998 et les échantillons de sol n°36 et 39 constituent le groupe 4, qui se différencie nettement de ceux des autres échantillons de sol, essentiellement par la deuxième composante principale. L'échantillon de boue prélevé en 1995 se différencie très nettement du reste des échantillons (sol, eau et boue), et forme à lui seul un groupe isolé (groupe 5).

L'analyse statistique multivariée précise donc les similitudes et dissimilitudes observées sur les profils :

- Les échantillons de sol se répartissent en 4 groupes se différenciant par leur distance par rapport au secteur du Vallon (par la première composante principale de l'ACP),
- Les échantillons de boue de la station d'épuration et l'eau de rejet de l'ancien incinérateur se différencient de ces échantillons de sol et présentent entre eux certaines similitudes,
- Le profil de l'échantillon de boue prélevé en 1995 est très différent,
- Les deux échantillons de sol n°36 et 39 ont des profils s'apparentant plus aux échantillons de boue et d'eau de rejet qu'aux autres échantillons de sol.

La faible similitude des profils de l'eau de rejet et des échantillons de sol ne permet pas de conforter l'hypothèse d'une contamination des sols par l'ancien incinérateur.

Les similitudes entre les échantillons de boue de 1989, 1990 et 1998 et l'eau de rejet de 1996 suggèrent une connexion possible entre l'ancien incinérateur et la station d'épuration de Vidy. L'hypothèse selon laquelle l'ancien incinérateur aurait contaminé les boues de la station d'épuration ne peut donc pas être rejetée.

Comme pour les échantillons de sol n°36 et 39, le profil très différencié de l'échantillon de boue prélevé en 1995 fait suspecter une erreur analytique, ou bien l'occurrence d'un événement unique (apport exceptionnel ?), qui aurait modifié ponctuellement le profil.

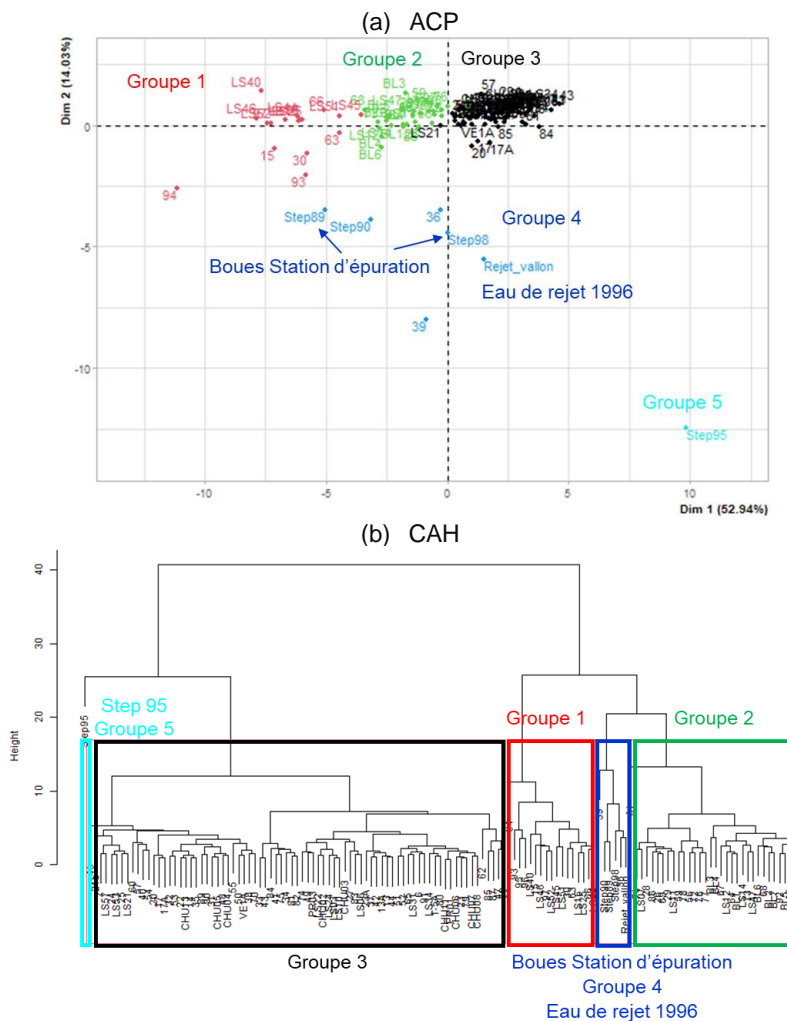


Figure 14 Résultats de l'analyse en composantes principales (ACP) et de la classification ascendante hiérarchique (CAH) en ajoutant les analyses d'eau de rejet de l'ancien incinérateur (Rejet_vallon) et des boues de la station d'épuration de Lausanne (Step 89 à Step 98) aux analyses des 130 échantillons de sol. (a) Echantillons de sol et

de rejet représentés dans l'espace des 2 premières composantes principales de l'ACP, (b) Dendrogramme représentant les regroupements des échantillons obtenus par la classification CAH.

6. Conclusions

L'analyse statistique multivariée des données disponibles sur la pollution aux dioxines et furanes découverte sur le territoire de la commune de Lausanne et des communes limitrophes d'Epalinges et du Mont-sur-Lausanne nous permet de formuler les conclusions suivantes sur les origines de la pollution :

- L'existence d'une source majeure qui serait située en dehors de la zone du Vallon, dans le périmètre où le sol a été échantillonné, est très peu probable. Les profils de congénères en dioxines et furanes, qui constituent une signature à la pollution, se différencient en effet en fonction de la distance des échantillons de sol par-rapport au Vallon, relation qui ne pourrait pas être observée si les sources se trouvaient situées ailleurs que dans le Vallon,
- L'hypothèse d'une source qui serait située à proximité du château est écartée, car la relation entre l'indicateur de pollution - construit pour résumer la caractéristique dominante des profils - et la distance des échantillons de sol au château, apparaît plus faible que celle obtenue avec la distance aux 3 autres sources suspectées,
- La relation observée entre la distance au Vallon et les teneurs en dioxines et furanes dans les échantillons de sol, mais également avec les profils de congénères, indique que la ou les sources de pollution étaient localisées dans le Vallon. Mais la proximité géographique des 3 sources suspectées – usine du Vallon, usine Pierre-de-Plan et ancienne décharge du Vallon – rend difficile la différenciation de leurs effets possibles sur les sols, d'autant plus qu'une unique analyse représentative du rejet de l'ancien incinérateur a été retrouvée dans les archives (pas d'analyses représentatives des rejets de l'usine de Pierre-de-Plan ni de l'ancienne décharge, pas d'autres analyses des rejets de l'ancien incinérateur),
- La dissimilitude du profil de l'analyse de 1996 de l'eau de rejet de l'usine du Vallon avec ceux des échantillons de sol ne permet pas d'attester d'une contribution de l'usine à la contamination des sols,
- Les analyses historiques (1989 à 1998) des boues de la station d'épuration de Lausanne à Vidy montrent des profils similaires à ceux calculés pour l'analyse d'eau de rejet de l'ancien incinérateur, mais différents de ceux des échantillons de sol du périmètre d'étude. Ces résultats suggèrent que l'ancien incinérateur pourrait avoir contribué à la pollution observée dans la station d'épuration.

Neuchâtel, le 27 Mars 2023



Hélène Demougeot-Renard
Directrice eOde



Baptiste Sauvaget
Consultant eOde

Bibliographie

- Airmes, 2021. Expertise sur l'origine d'une pollution des sols à Lausanne (No. 7300). Direction de l'environnement industriel, urbain et rural, canton de Vaud, Kirchberg.
- Aldea, M., Edwards, M., Pietari, J., Boehm, P., 2016. Cautions on the treatment of non-detect results for environmental forensics. *Environmental Forensics* 17, 311–318. <https://doi.org/10.1080/15275922.2016.1230908>
- Bock, M.J., Brown, L.E., Wenning, R.J., Bell, J.L., 2021. Sources of 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo- *p* -dioxin and Other Dioxins in Lower Passaic River, New Jersey, Sediments. *Environ Toxicol Chem* 40, 1499–1519. <https://doi.org/10.1002/etc.4974>
- Bodénan, F., Garrido, F., 2004. Devenir des dioxines dans les sols. Analyse critique de données bibliographiques (No. RP-53070-FR). BRGM, Orléans.
- Cejas, M.J., Barrick, R.C., 2021. Chemometric mapping of polychlorinated dibenzo- *p* -dioxin (PCDD) and dibenzofuran (PCDF) congeners from the Passaic River, NJ: Integrated application of RSIMCA, PVA, and t-SNE. *Environmental Forensics* 22, 155–171. <https://doi.org/10.1080/15275922.2020.1834022>
- Denys, S., Gombert, D., Tack, K., 2012. Combined approaches to determine the impact of wood fire on PCDD/F and PCB contamination of the environment: A case study. *Chemosphere* 88, 806–812. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.03.086>
- 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.
- Fiedler, H., Lau, C., Kjeller, L.-O., Rappe, C., 1996. Patterns and sources of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans found in soil and sediment samples in Southern Mississippi. *Chemosphere* 32, 421–432. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(96\)00001-X](https://doi.org/10.1016/0045-6535(96)00001-X)
- Götz, R., 1998. Dioxin, dioxin-like PCBs and organotin compounds in the river elbe and the hamburg harbour: Identification of sources. *Water Science and Technology* 37. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(98\)00200-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(98)00200-5)
- Götz, R., Lauer, R., 2003. Analysis of Sources of Dioxin Contamination in Sediments and Soils Using Multivariate Statistical Methods and Neural Networks. *Environ. Sci. Technol.* 37, 5559–5565. <https://doi.org/10.1021/es030073t>
- Meneses, M., Schuhmacher, M., Domingo, J.L., 2004. Health risk assessment of emissions of dioxins and furans from a municipal waste incinerator: comparison with other emission sources. *Environment International* 30, 481–489. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.10.001>
- Murphy, B., Morrison, R.D., 2015. Introduction to environmental forensics, 3d edition. ed. Elsevier Academic Press, Oxford.
- Nadal, M., Agramunt, M.C., Schuhmacher, M., Domingo, J.L., 2002. PCDD/PCDF congener profiles in soil and herbage samples collected in the vicinity of a municipal waste incinerator before and after pronounced reductions of PCDD/PCDF emissions from the facility. *Chemosphere* 49, 153–159. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00276-X](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00276-X)
- 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).
- Oh, J.-E., Choi, S.-D., Lee, S.-J., Chang, Y.-S., 2006. Influence of a municipal solid waste incinerator on ambient air and soil PCDD/Fs levels. *Chemosphere* 64, 579–587. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.11.012>
- Schuhmacher, M., Domingo, J.L., 2006. Long-term study of environmental levels of dioxins and furans in the vicinity of a municipal solid waste incinerator. *Environment International* 32, 397–404. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.09.002>
- Shields, W.J., Tondeur, Y., Benton, L., Edwards, M.R., 1964. Dioxins and Furans, in: *Environmental Forensics*. Elsevier, pp. 293–312. <https://doi.org/10.1016/B978-012507751-4/50036-7>
- Towey, T.P., Chang, S.-C., Demond, A., Wright, D., Barabás, N., Franzblau, A., Garabrant, D.H., Gillespie, B.W., Lepkowski, J., Luksemburg, W., Adriaens, P., 2010. Hierarchical cluster analysis of polychlorinated dioxins and furans in Michigan, USA, soils: Evaluation of industrial and background congener profiles. *Environ Toxicol Chem* 29, 64–72. <https://doi.org/10.1002/etc.24>
- Zhou, T., Bo, X., Qu, J., Wang, L., Zhou, J., Li, S., 2019. Characteristics of PCDD/Fs and metals in surface soil around an iron and steel plant in North China Plain. *Chemosphere* 216, 413–418. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.024>

Figures

Figure 1 Carte de localisation des 4 sources potentielles de pollution et des 130 échantillons de sol utilisés dans la présente étude dans lesquels les dioxines et furanes ont été analysés. Coordonnées en m dans le cadre de référence CH1903+/LV95.	8
Figure 2 Profils de congénères mesurés dans des échantillons de sol sous l'influence d'un incinérateur (Nadal et al., 2002) (a) et de feux de bois sur un site industriel (Denys et al., 2012) (b). La proportion d'OCDD est largement dominante dans le profil (a), ce qui n'est pas le cas dans (b). Profil composé des proportions des teneurs en chacun des 17 congénères (ratio 1).	10
Figure 3 4 profils de congénères calculés pour l'échantillon de sol n°49 à partir des teneurs en dioxines et furanes analysées au laboratoire.	11
Figure 4 Représentation schématique de l'analyse statistique itérative appliquée aux données disponibles sur la pollution des sols de Lausanne aux dioxines et furanes.	13
Figure 5 Statistiques élémentaires représentées sous forme de boxplots (boîtes à moustaches) des teneurs en congénères, teneurs totales en dioxines, teneurs totales en furanes, et teneurs totales en dioxines et furanes (PCDD-F) analysées dans les 130 échantillons de sol retenus pour l'analyse statistique multivariée (unité : ng/kg ms).	15
Figure 6 Corrélations entre les 17 variables initiales formées des ratios 1 de congénères dans les 130 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.	18
Figure 7 Groupes d'échantillons de sol identifiés par la combinaison d'une analyse en composantes principales (ACP) et d'une classification ascendante hiérarchique (CAH) appliquées aux ratios 1 des 130 échantillons de sol. (a) Echantillons de sol représentés dans l'espace des 2 premières composantes principales de l'ACP, (b) Dendrogramme représentant les regroupements des échantillons obtenus par la classification ascendante hiérarchique (CAH).	19
Figure 8 Carte de localisation des 130 échantillons de sol par groupes identifiés par CAH, superposés à la classification des sols la plus probable obtenue par l'étude géostatistique (eOde, 2021). Coordonnées en m dans le cadre de référence CH1903+/LV95.	20
Figure 9 Profils moyens calculés pour les groupes d'échantillons de sol 1 à 4 différenciés par les statistiques multivariées ACP et CAH, classés de haut en bas par distance décroissante par rapport au Vallon (cf. carte Figure 8). Le nombre indiqué sur les figures correspond à l'indicateur de pollution, rapport entre la proportion de 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD et celle d'OCDD.	21
Figure 10 Profil moyen calculé pour le groupe 5 constitué de l'unique échantillon de sol n°39 différencié par les statistiques multivariées ACP et CAH (Figure 8). Le nombre indiqué sur la figure correspond à l'indicateur de pollution, rapport entre la proportion de 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD et celle d'OCDD.	22
Figure 11 Nuages de corrélation entre l'indicateur de pollution aux dioxines et furanes (rapport entre le pourcentage de 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD et le pourcentage d'OCDD) et la distance à la source de pollution calculé pour les 4 sources suspectées. ρ indique le coefficient de corrélation linéaire, la ligne bleue est la droite de régression ajustée aux données.	23
Figure 12 Profil (ratio 1) calculé pour l'analyse d'eau de rejet de l'ancien incinérateur prélevée le 27 aout 1996. Le nombre indiqué sur la figure correspond à l'indicateur de pollution, rapport entre la proportion de 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD et celle d'OCDD.	24
Figure 13 Profils (ratios 1) calculés pour les analyses de boue de la station d'épuration de Lausanne à Vidy. Le nombre indiqué sur les figures correspond à l'indicateur de pollution, rapport entre la proportion de 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD et celle d'OCDD.	25
Figure 14 Résultats de l'analyse en composantes principales (ACP) et de la classification ascendante hiérarchique (CAH) en ajoutant les analyses d'eau de rejet de l'ancien incinérateur (Rejet_vallon) et des boues de la station d'épuration de Lausanne (Step 89 à Step 98) aux analyses des 130 échantillons de sol. (a) Echantillons de sol et de rejet représentés dans l'espace des 2 premières composantes principales de l'ACP, (b) Dendrogramme représentant les regroupements des échantillons obtenus par la classification CAH.	26

Tableaux

Tableau 1 Congénères et TEF intervenant dans le calcul de la somme TEQ des teneurs en dioxines et furanes, et des proportions de congénères du ratio 3.	11
Tableau 2 Statistiques élémentaires des teneurs en congénères, teneurs totales en dioxines, teneurs totales en furanes, et teneurs totales en dioxines et furanes (PCDD-F) analysées dans les 130 échantillons de sol retenus pour l'analyse statistique multivariée (unité : ng/kg ms).	15
Tableau 3 Teneurs en dioxines et furanes mesurées dans un échantillon d'eau de rejet de l'ancien incinérateur en 1996 et dans 4 échantillons de boues de la station d'épuration de Lausanne entre 1989 et 1998.	16

Annexes

Annexe 1 Travaux réalisés et ressources mises en œuvre

Travaux réalisés

- Réflexions en amont
- Recherches et synthèse bibliographiques
- Elaboration d'un programme de travail
- Discussions le 23 Septembre 2021 avec la DIREV et GEODE sur les données disponibles, sur la base d'une note technique préparée par eOde
- Préparation des données
- Calcul des pourcentages de congénères
- Construction des variables géographiques
- Développement du script de calcul des profils, application aux données
- Développement du script de calcul des statistiques univariées
- Application du script de calcul des statistiques univariées aux données, analyse des résultats
- Développement du script de calcul des statistiques multivariées
- Application du script de calcul des statistiques multivariées aux données, analyse des résultats
- Développement du script de calcul des statistiques bivariées
- Application du script de calcul des statistiques bivariées aux données, analyse des résultats
- Recherche de codes disponibles pour appliquer un modèle de récepteur, tests et évaluation de l'intérêt pour le cas traité
- Application des scripts à de nouvelles sélections de données et variables, étude comparative des résultats
- Saisie des données de rejet de l'usine du Vallon et des boues de Step et application des scripts
- Préparation et analyse des profils des échantillons proches des sources
- Ajout des TEQ aux ACP et autres modifications des données
- Application des scripts aux profils moyens par groupes d'échantillons identifiés par CAH
- Application des scripts aux données, en substituant les valeurs <LQ par 0 ou par LQ, comparaison aux résultats obtenus avec une substitution pas 0.5LQ
- Recherche dans la littérature de profils trouvés à proximité d'anciens incinérateurs ou d'autres activités industrielles, comparaison aux données de Lausanne
- Coordination interne, contrôle-qualité
- Visioconférence du 29 Octobre 2021 de présentation et discussion des résultats à la DIREV et GEODE
- Visioconférence du 19 Novembre 2021 de présentation et discussion des résultats à la DIREV et GEODE, avec la société Airmes
- Fourniture le 22 Novembre 2021 à la DIREV d'un fichier pptx de présentation des résultats
- Rédaction du présent rapport.

Ressources

L'analyse statistique multivariée a été réalisée à l'aide de scripts développés spécifiquement pour le projet en langage R (<https://www.r-project.org/>).

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 Détails sur les conditions de traitement statistique des données

- Calcul des ratios suivant les 4 équations :

$$\text{Ratio 1} = \frac{\text{Congénère}}{\sum 17 \text{ Congénères}}$$

$$\text{Ratio 2} = \frac{\text{Congénère}}{\text{Homologue}}$$

$$\text{Ratio 3} = \frac{\text{Congénère} \cdot \text{TEF}}{\sum 17 \text{ Congénères} \cdot \text{TEF}} = \frac{\text{Congénère} \cdot \text{TEF}}{\text{TEQ}}$$

$$\text{Ratio 4} = \frac{\text{Homologue}}{\sum 17 \text{ Congénères}}$$

- Calcul des données géographiques descriptives :
 - Distance à chaque source potentielle (en m)
 - Différence d'altitude par rapport à chaque source potentielle (en m)
 - Angle par-rapport au Nord de la ligne joignant la source au point de prélèvement (en degrés) calculé par trigonométrie avec les coordonnées géographiques
- Représentation des profils de ratios d'une sélection d'échantillons

Analyse univariée et multivariée

- Chargement des données
- Découpage du fichier par classes de paramètres (données brutes, ratios 1 à 4, données descriptives et géographiques)
- Calcul des dérives liées à chaque source potentielle (avec la formule utilisée pour la cartographie des dioxines) :

$$\text{Dérive} = \text{distance à la source (en m)} + (\text{altitude du point (en m)} - \text{altitude de référence})$$
- Calcul du rapport %HpCDD/%OCDD pour le ratio 1 de chaque échantillon
- Calcul des statistiques élémentaires sur les analyses brutes et sur les 4 ratios
- Calcul de l'ACP (normalisation des données, « centrées-réduites »), représentation des 3 premiers facteurs
- Classification ascendante hiérarchique sur données centrées-réduites, calcul de la distance et classification avec la méthode « Ward.D2 ». Découpe du dendrogramme à 5 classes. Représentation graphique en dendrogramme et en carte. Sauvegarde des groupes identifiés
- Représentation des résultats d'ACP avec les couleurs des groupes de la classification

Cas testés :

Ratio 1	Ratio 1 + données géographiques	Ratio 1 + dérives
Ratio 2	Ratio 2 + données géographiques	Ratio 2 + dérives
Ratio 3	Ratio 3 + données géographiques	Ratio 3 + dérives
Ratio 4	Ratio 4 + données géographiques	Ratio 4 + dérives

Sur données d'analyses de sols et en ajoutant les rejets de l'usine du Vallon et les analyses des boues de la Step

- Représentation des histogrammes des analyses par congénère et sur données brutes
- Représentation des box-plots des analyses par congénère et sur données brutes
- Cartes des valeurs brutes par congénères

Analyse bivariée

- Chargement des données
- Découpage du fichier par classes de paramètres (données brutes, ratios 1 à 4, données descriptives et géographiques)
- Calcul des dérives liées à chaque source potentielle (avec la formule utilisée pour la cartographie des dioxines)
- Calcul du rapport %HpCDD/%OCDD pour le ratio 1 de chaque échantillon

- Calcul des matrices de corrélation entre toutes les variables (Données brutes, ratios, rapport %HpCDD/%OCDD, données géographiques et dérivées)
- Réalisation et sauvegarde des nuages de corrélation entre :
 - La teneur totale en PCDD-F en TEQ ng/kg ms (brute ou log-transformée) et la distance à chaque source potentielle
 - Le rapport %HpCDD/%OCDD et la distance à chaque source potentielle
 - La teneur totale en PCDD-F en TEQ ng/kg ms (brute ou log-transformée) et la différence d'altitude avec chaque source potentielle
 - Le rapport %HpCDD/%OCDD et la différence d'altitude avec chaque source potentielle
 - La teneur totale en PCDD-F en TEQ ng/kg ms (brute ou log-transformée) et la dérive associée à chaque source potentielle
 - Le rapport %HpCDD/%OCDD et la dérive associée à chaque source potentielle

Analyse de sensibilité à la limite de quantification

- Réalisation des analyses univariées, multivariées et bivariées sur les analyses dans trois cas de substitution des valeurs inférieures à la LQ :
 - Substitution par 0
 - Substitution par $\frac{1}{2}$ de la LQ (présentés dans le rapport)
 - Substitution par la LQ
- Conclusion : Pas d'impact majeur.