

# LA CARTOGRAPHIE GÉOSTATISTIQUE POUR ÉVALUER LES RISQUES SANITAIRES

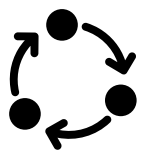
## LE CAS DE LA POLLUTION DES SOLS À LA DIOXINE

**Hélène Demougeot-Renard et Baptiste Sauvaget**

Rencontres ASIT du 18 Juin 2026



## Analyse de données et modélisation 3D appliquées aux milieux anthropisés



Depuis 2010 (Sàrl : 2014)  
Double compétence Data et SSP  
Etudes, conseils, R&D, formation

Géostatistique, statistique  
Géomatique  
Machine Learning (random forest)  
Forensie environnementale  
Programmation informatique



Confédération : OFEV, OFSP  
Cantons : Berne, Fribourg, Jura,  
Valais, Vaud  
Villes : Moutier, Neuchâtel  
BE : CSD, BEG, IG, Geotest  
MO : CFF

Institutionnels : ADEME, BRGM, INERIS  
Collectivités : Grand Lyon, Ris-Orangis  
Dépollueurs & BE : Ortec, Element-Terre,  
Ginger-Burgeap, Ramboll  
MO : EDF  
Mines Douai & Paris, RECORD



## Quelques références



Estimation des volumes de matériaux contaminés aux PCB de la décharge de la Pila (Fribourg)



Construction d'une carte indicative cantonale du potentiel de pollution des sols à partir de couches SIG (Vaud)



Identification de traceurs des apports en matière solide et en polluants des sédiments d'un canal par analyse statistique et random forest



Recherche de relations de cause à effet entre des sources potentielles de PFAS et des points de surveillance des eaux souterraines (OFEV)



Contribution au développement de la méthodologie française de détermination de valeurs de fonds de sols anthropisés



Développement d'une méthode et d'un code de cartographie des risques sanitaires

# CONTEXTE DE RÉALISATION DES CARTES

## ATOUTS

- On nous demande notre avis sur le plan d'échantillonnage
- Approche itérative
- « Carte blanche » pour une méthode adaptée aux spécificités de la pollution et aux besoins du canton
- Nombreuses interactions avec les acteurs du projet.

## DÉFIS

- Délais très courts
- Contexte réglementaire instable : seuils, nombre de seuils, référence analytique ASE/Soxhlet,...
- Il faut s'adapter à la réalité (autorisation d'accès aux parcelles, nombre limité de sols de jardin disponibles à l'échantillonnage).

# HISTORIQUE DE RÉALISATION DES CARTES

Des analyses de sol  
révèlent des  
teneurs élevées en  
dioxines et furanes  
à Lausanne

**Début 2021**

**Mi-2021**

**Octobre**

**Fin 2021**

Investigations du sol

**IMPACT – CONCEPT SA**  
ENVIRONNEMENT GÉOLOGIE EAU ENERGIE

Analyse et cartographie **eOde**

Evaluation sanitaire **unisanté**

Le canton précise le  
périmètre de la  
pollution et arrête des  
recommandations  
sanitaires

**Publication de la  
première carte**  
**Limite à 20 ng TEQ/kg ms**

# HISTORIQUE DE RÉALISATION DES CARTES

Le canton précise le périmètre de la pollution et les recommandations sanitaires

Début 2022

Mi-2022

Oct. 2022

Janv. 2023

Compilation + investigations sup

IMPACT – CONCEPT SA  
ENVIRONNEMENT GÉOLOGIE EAU ENERGIE

Nouvelle analyse et cartographie eOde

**Publication de nouvelles cartes**  
**Limite à 5 ng TEQ/kg ms**

Evaluation sanitaire – consommation d'œufs unisanté

## NOTRE FEUILLE DE ROUTE

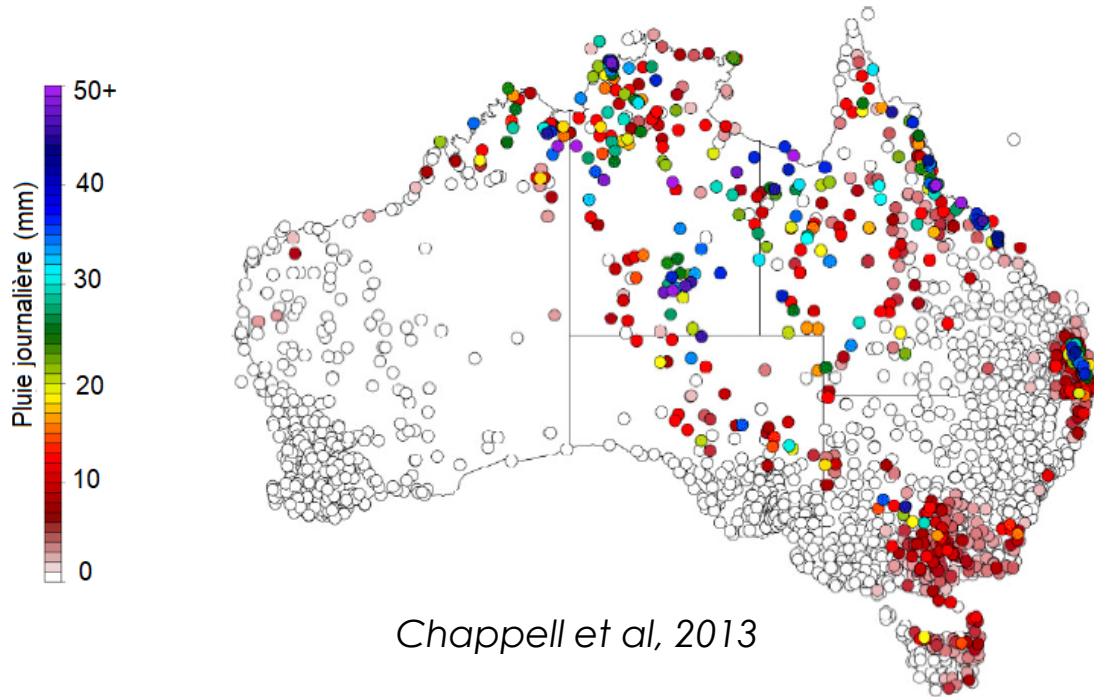
- Sols de surface ( 5 - 20 cm)
- Sols anciens non remaniés = **représentation sécuritaire** de l'état actuel des sols
- Somme des teneurs en polychlorodibenzodioxines et polychlorodibenzofuranes (PCDD-F) en équivalent toxique (TEQ ng/kg ms)
- Différentes valeurs seuils à appliquer pour définir des classes de teneurs
- Recherche de la **limite 20 + 5 ng TEQ/kg ms PCDD-F**
- Cartographie en 2D.

Congénères et TEF intervenant dans le calcul de PCDD-F (OMS 2005)

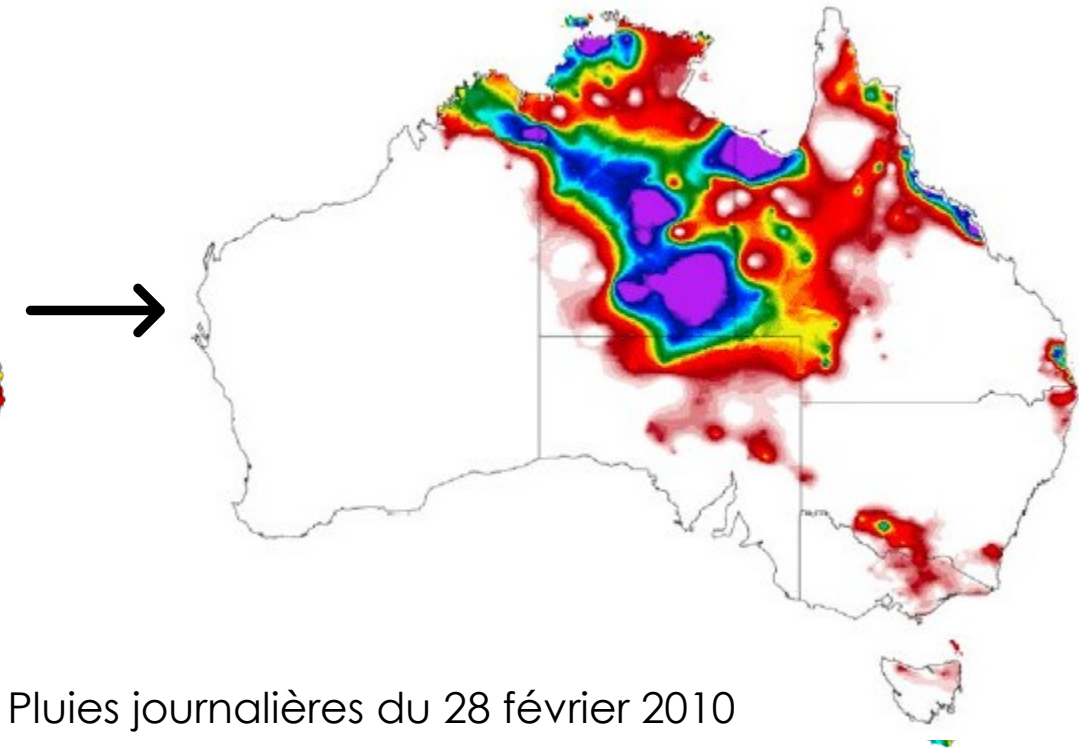
Groupe	Congénères	TEF
Dioxines	2,3,7,8-TCDD	1
	1,2,3,7,8-PeCDD	1
	1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1
	1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1
	1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1
	1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.01
	OCDD	0.0003
Furanes	2,3,7,8-TCDF	0.1
	1,2,3,7,8-PeCDF	0.03
	2,3,4,7,8-PeCDF	0.3
	1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.1
	1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1
	1,2,3,7,8,9-HxCDF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

# LA GÉOSTATISTIQUE EN QUELQUES MOTS

Données pluviométriques

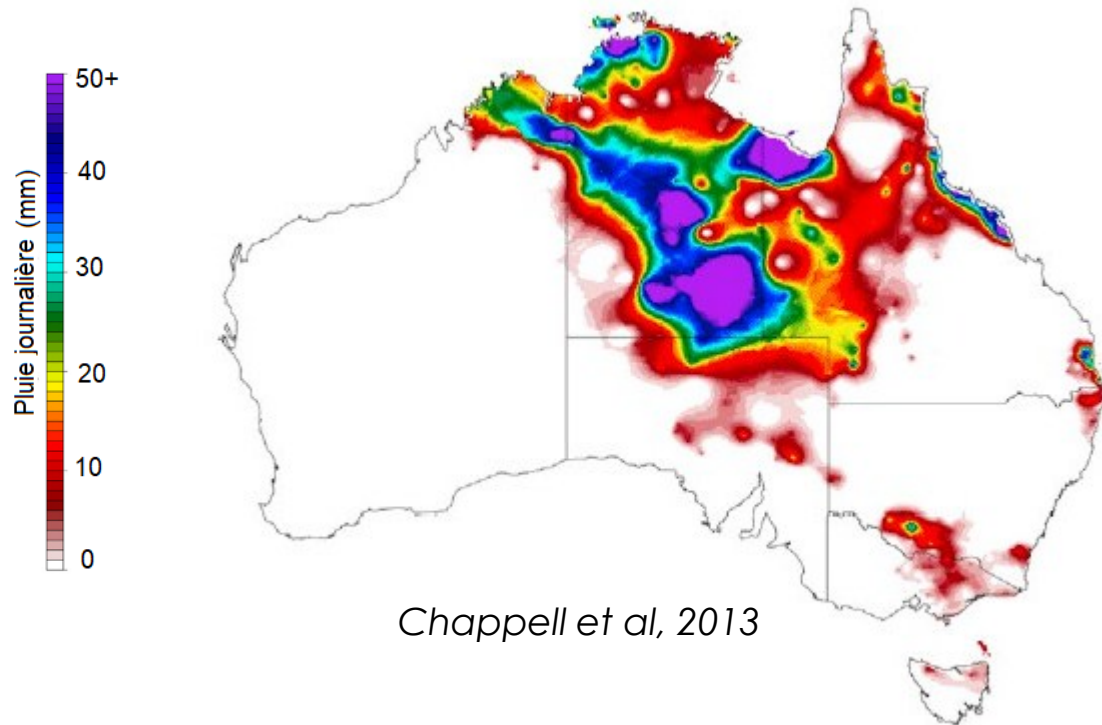


Estimation des pluies par krigage

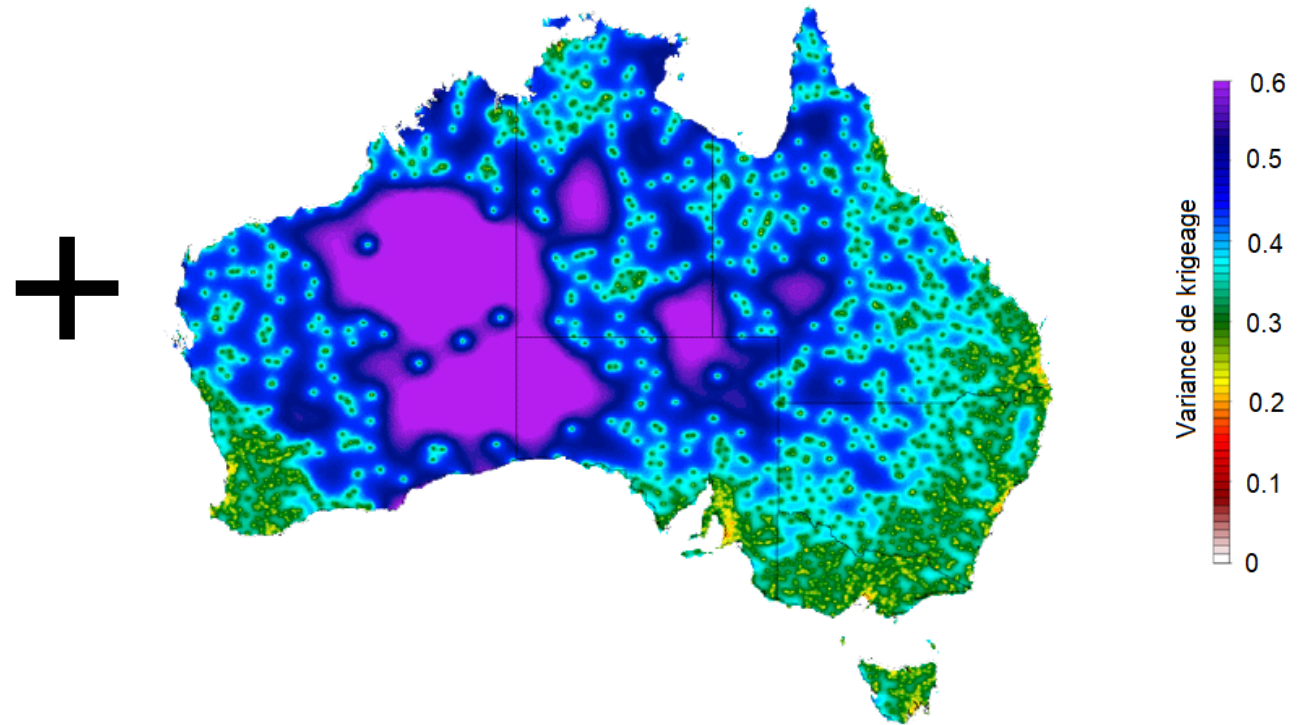


# LA GÉOSTATISTIQUE EN QUELQUES MOTS

Estimation des pluies par krigeage



Incertitude d'estimation



# LA GÉOSTATISTIQUE EN QUELQUES MOTS



Danie Krige

Méthodes  
d'interpolation de  
phénomènes spatio-  
temporels (1D → 4D)

Modèle de variations  
spatio-temporelles basé  
sur les données →  
variographie

Cadre probabiliste →  
estimation rigoureuse  
de l'incertitude

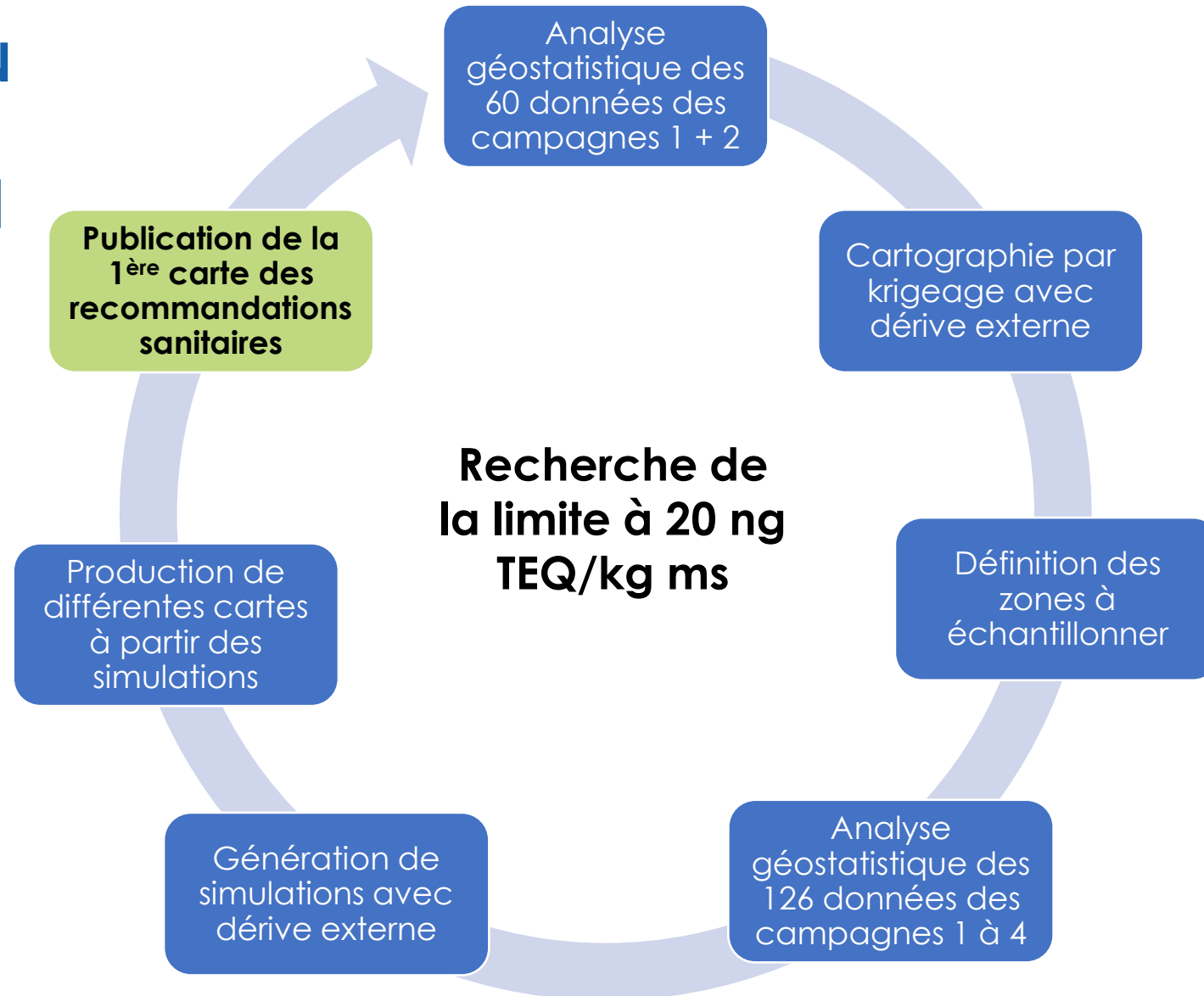
Très nombreuses  
méthodes d'estimation  
linéaire  
et non linéaire

Estimations locales  
(cartographie) et/ou  
globales (volumes,  
masses)

Possibilité de traduction  
des modèles en  
résultats opérationnels  
(cartographie des  
risques sanitaires)

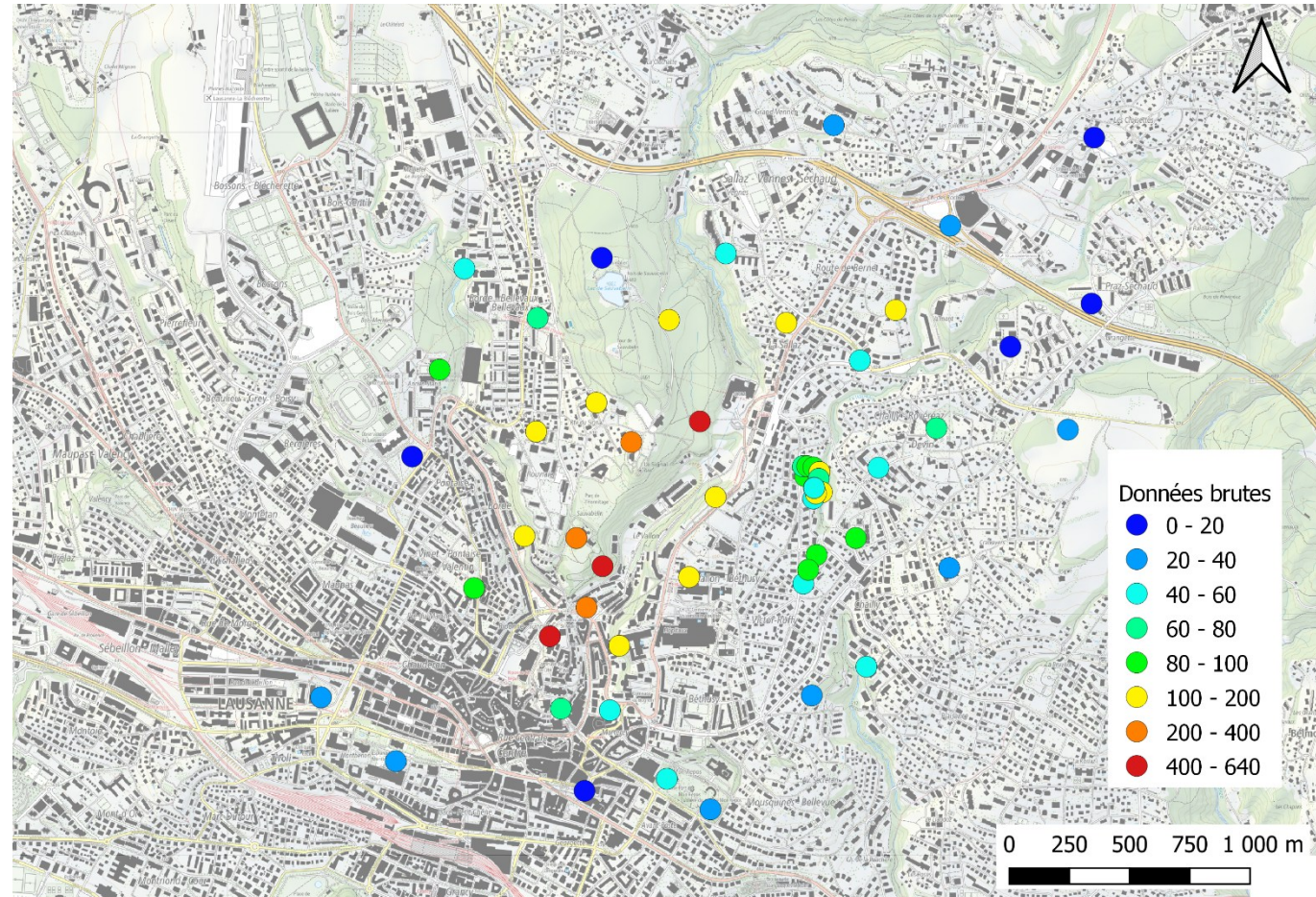
**Notre pratique : conjugaison expertise / modèle mathématique (pas de procédure automatique)**

# CONSTRUCTION DE LA PREMIÈRE CARTE EN 2021

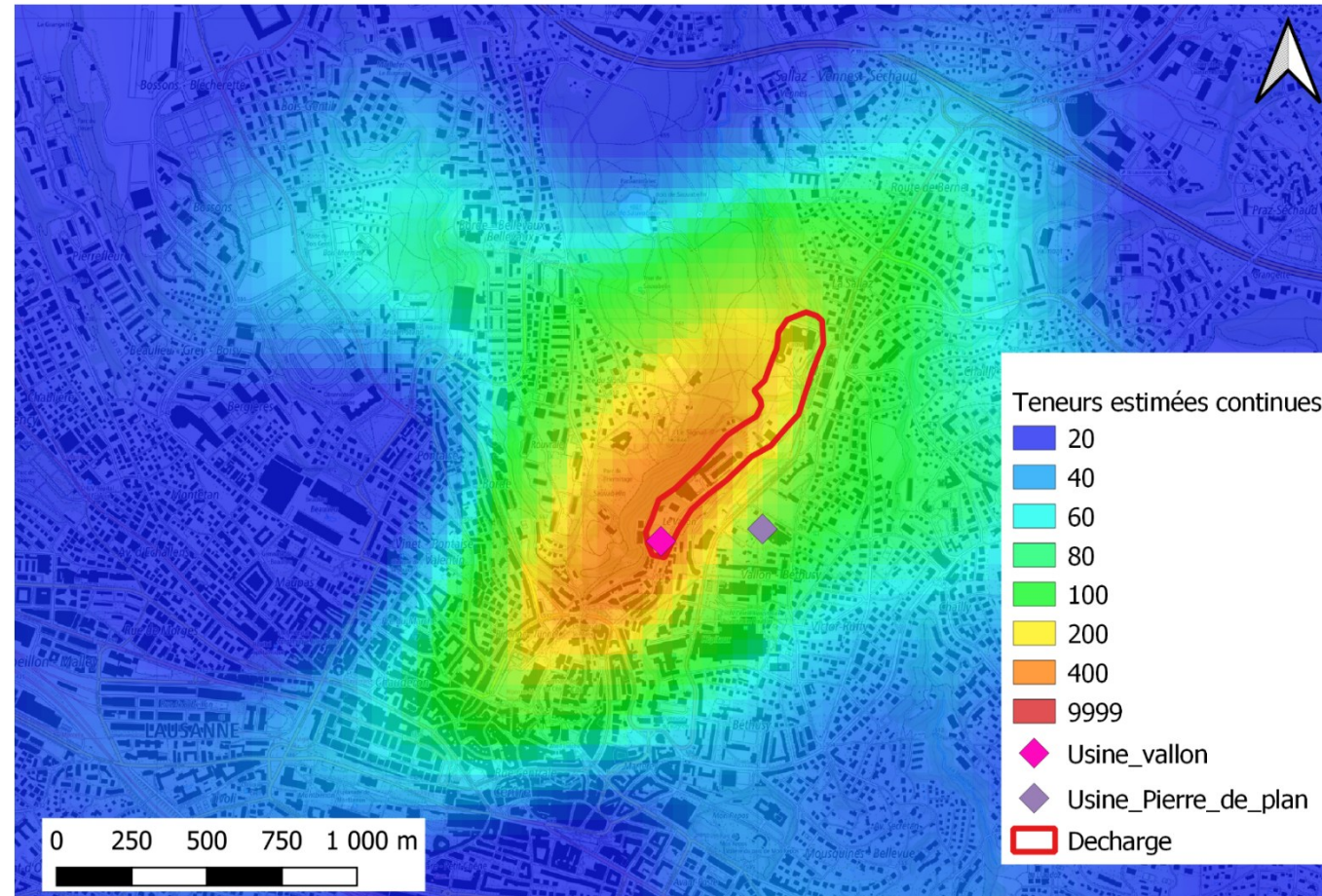


# CAMPAGNES D'ÉCHANTILLONNAGE 1 + 2

	PCDD-F
<b>Nb.</b>	<b>56</b>
Min	11
Max	640
<b>Moy.</b>	<b>108</b>
$\sigma$	132
P5%	14
P50%	58
P95%	423

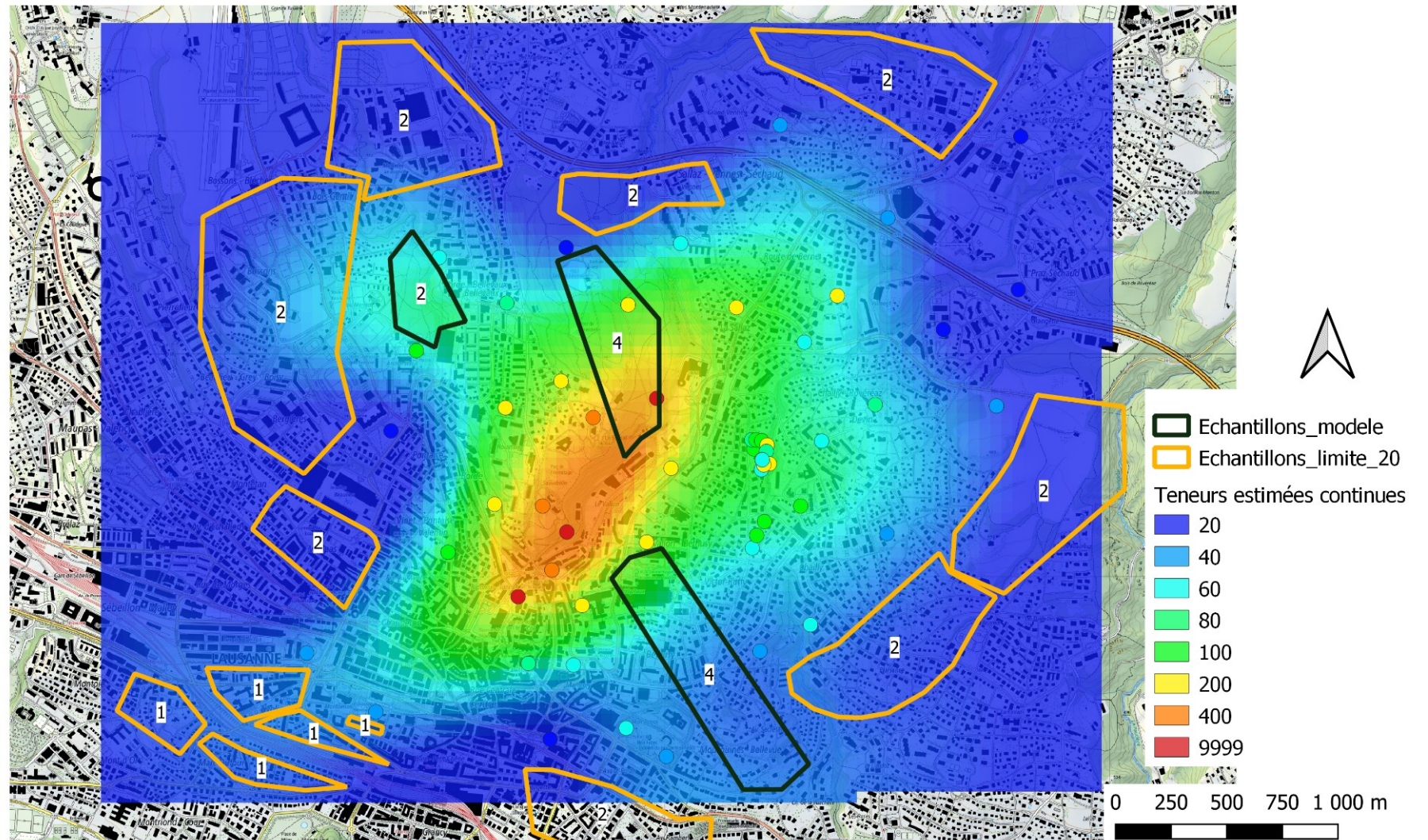


# CARTOGRAPHIE PAR KRIGEAGE AVEC DÉRIVE EXTERNE



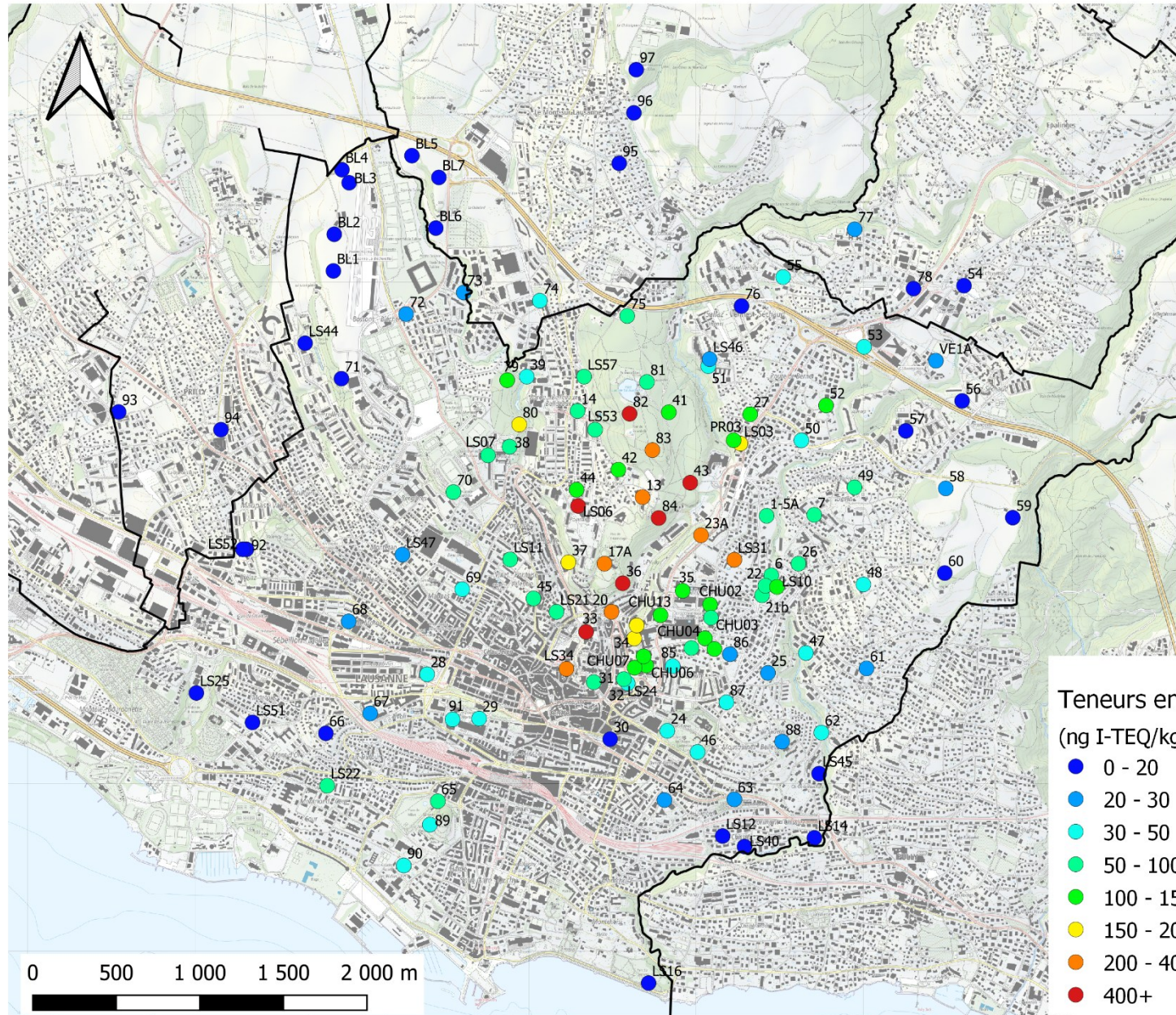
# DÉFINITION DES ZONES À ÉCHANTILLONNER

- Rechercher la limite à 20 ng TEQ/kg ms
- Préciser la variabilité spatiale de la pollution



# DONNÉES DES CAMPAGNES 1 À 4

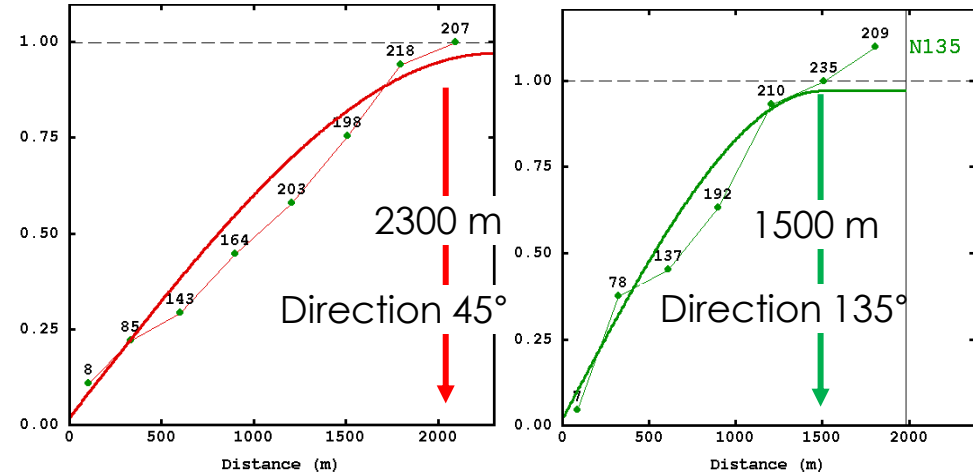
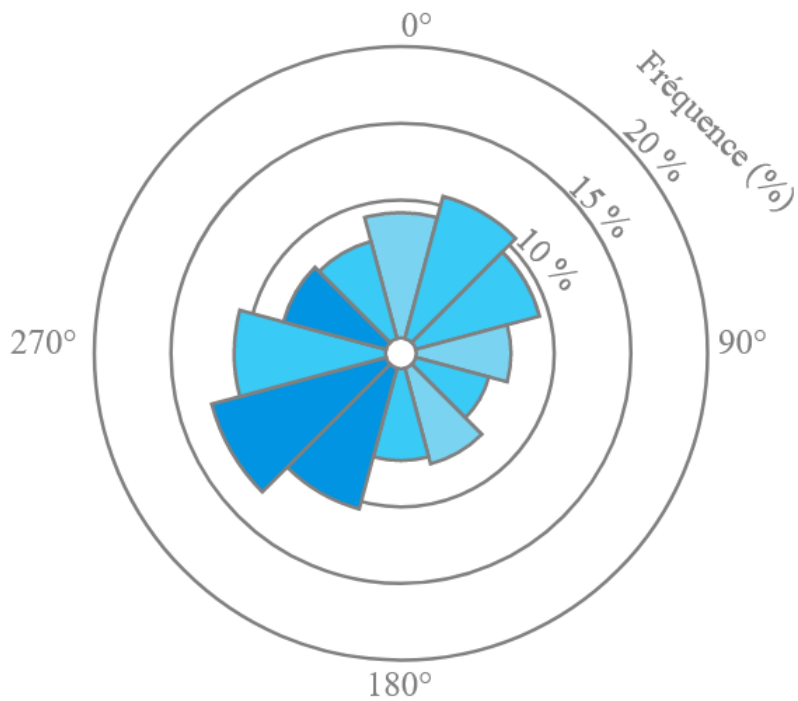
	PCDD-F
<b>Nb.</b>	<b>126</b>
Min	2
Max	640
<b>Moy.</b>	<b>93</b>
$\sigma$	121
P5%	6
P50%	47
P95%	385



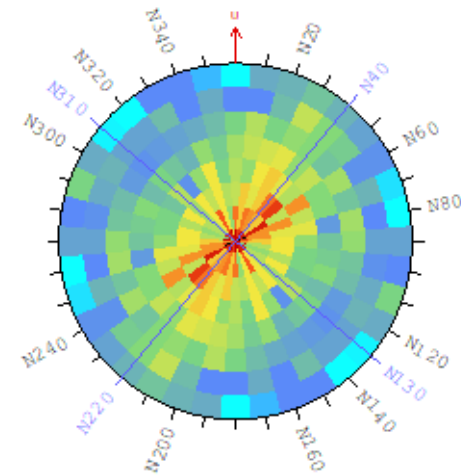
# ANALYSE GÉOSTATISTIQUE

La répartition spatiale des teneurs en PCDD-F est anisotrope et cohérente avec la direction des vents dominants.

Rose des vents



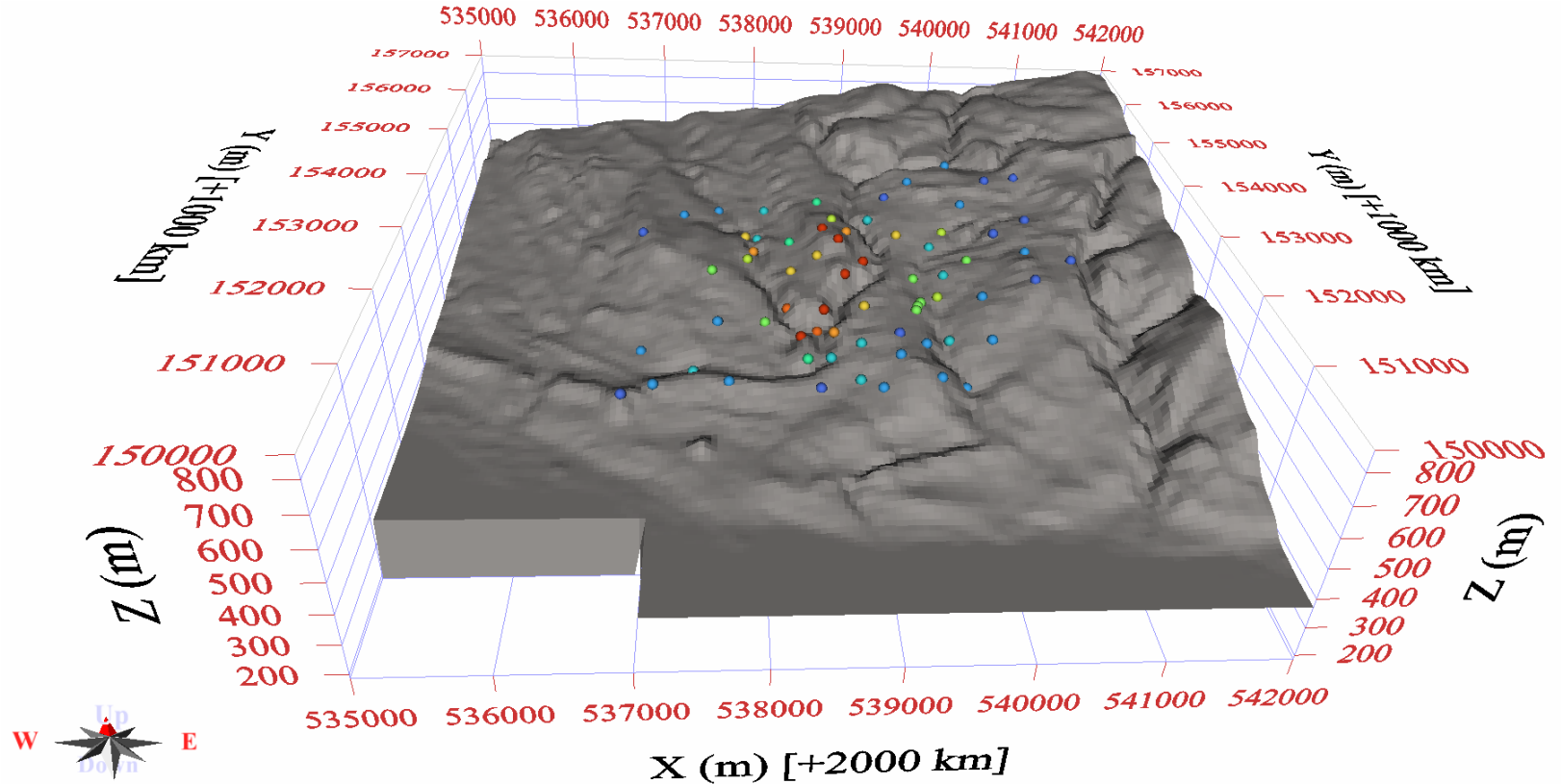
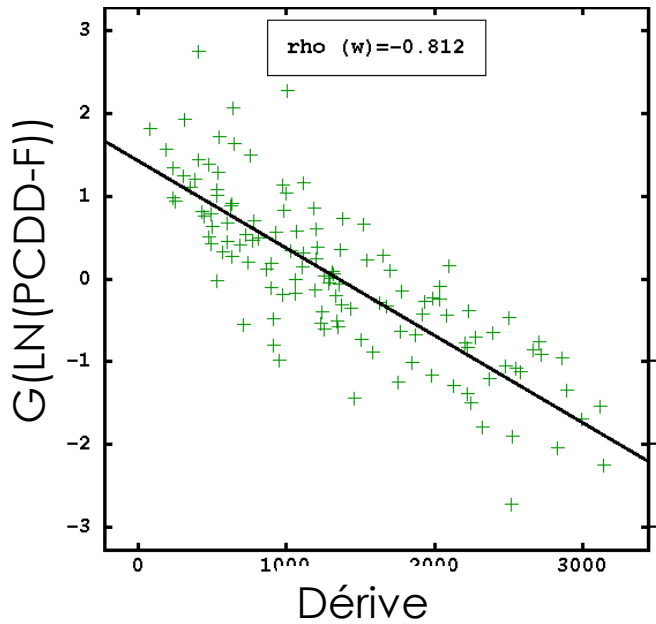
Variogrammes directionnels



Carte variographique

# ANALYSE GÉOSTATISTIQUE

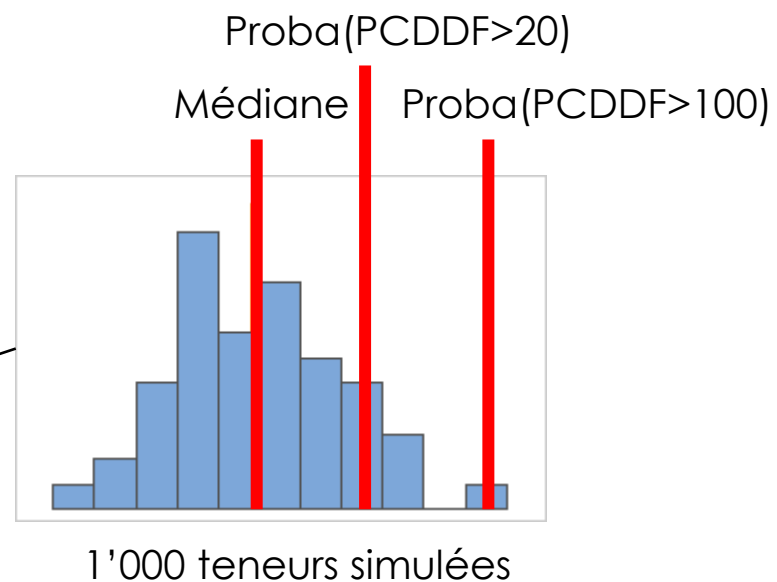
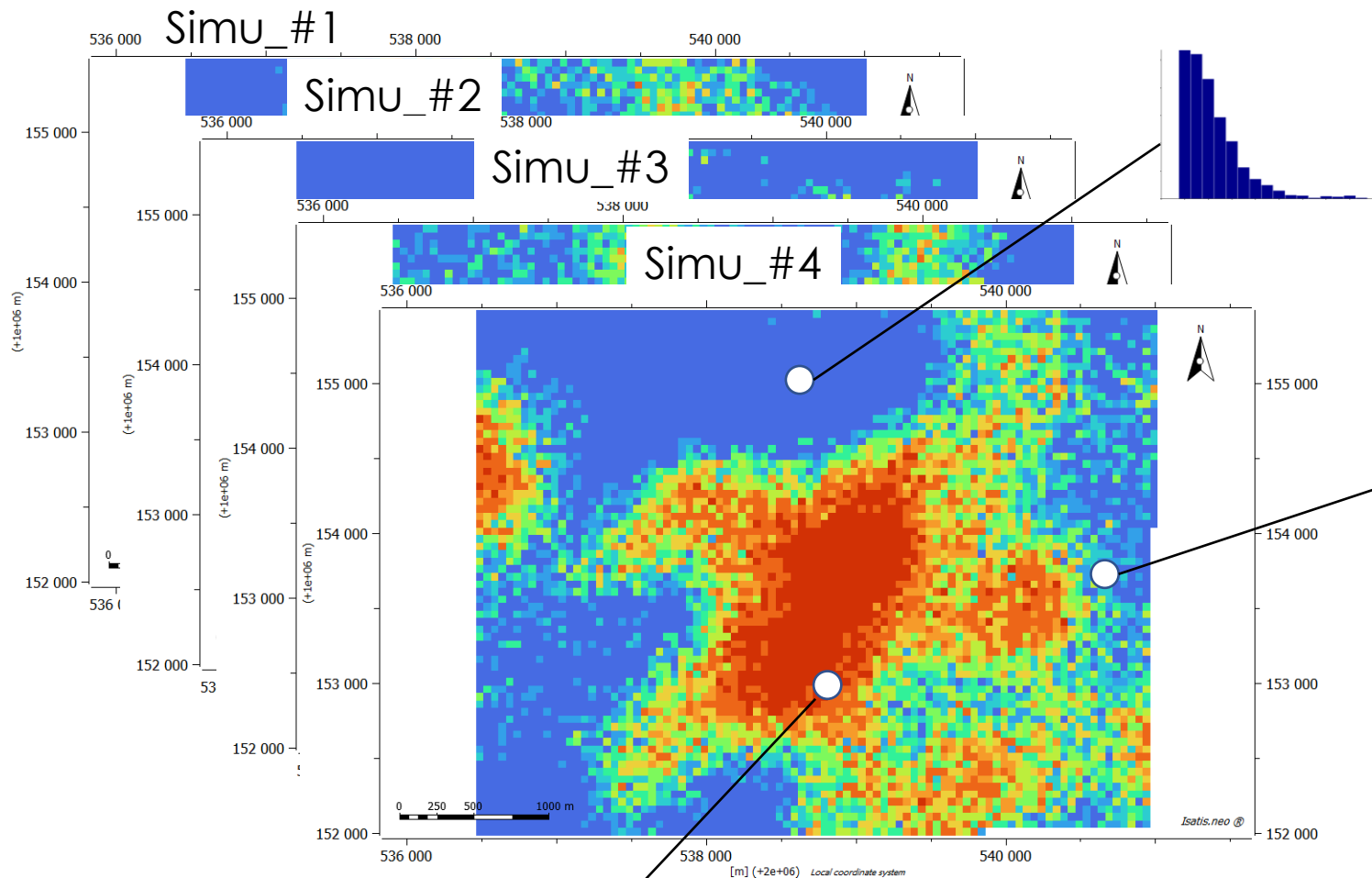
Le relief a une influence sur la répartition spatiale des teneurs en PCDD-F.



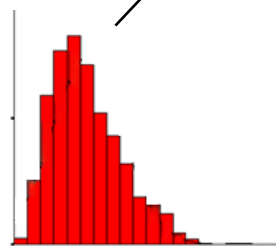
$$G(\ln(\text{PCDD-F})) = -0.00105 \cdot \text{Dérive} + 1.4208$$

$$\text{Dérive} = 1 \cdot \text{Dist\_vallon} + 1 \cdot \text{Dz}$$

# MODÉLISATION GÉOSTATISTIQUE

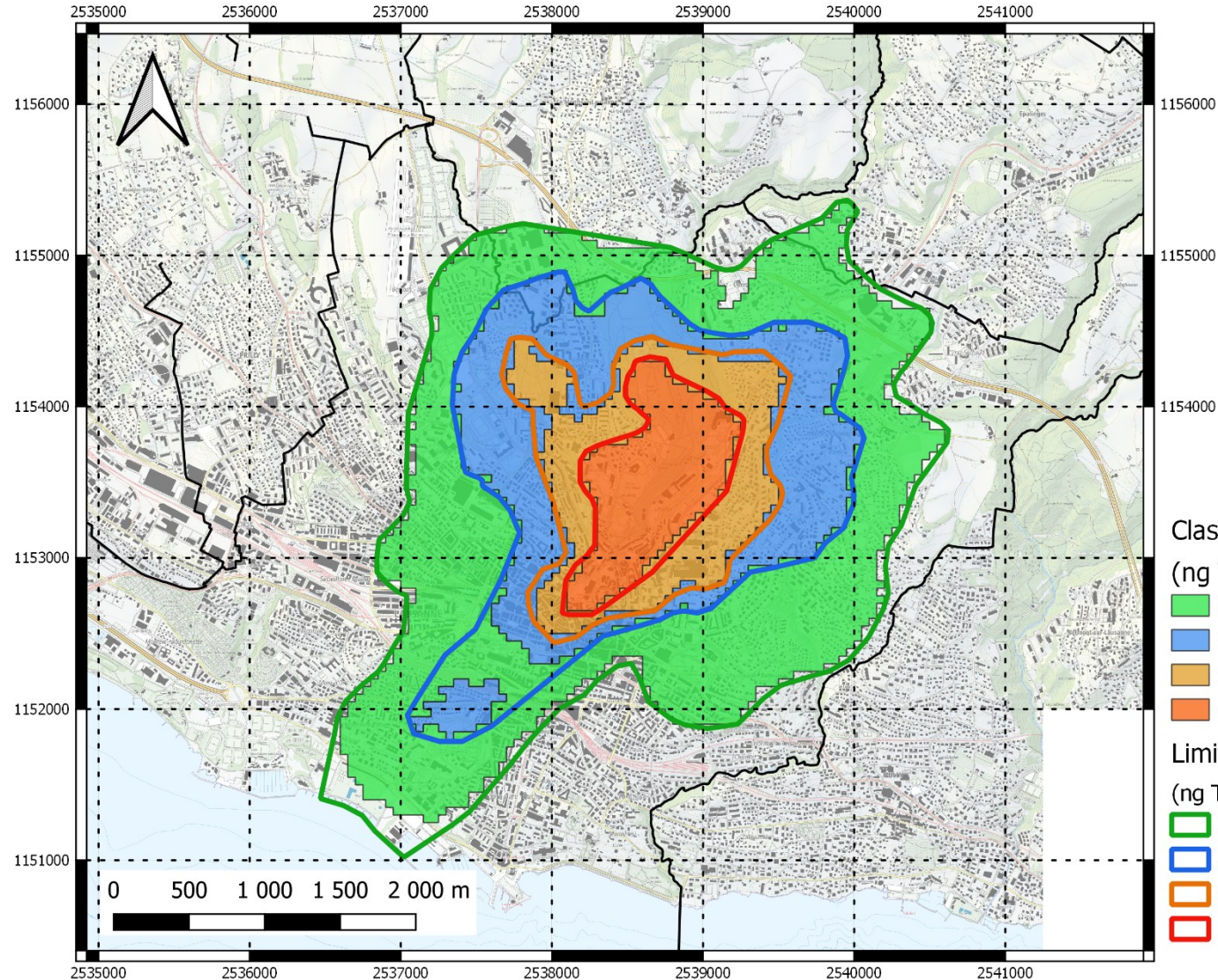


**Génération de 1'000 simulations conditionnelles des teneurs en PCDD-F de bloc - dans le modèle de variogramme anisotrope - avec dérive externe.**



# CARTE RETENUE PAR LE CANTON

Classes de teneurs les plus probables  
Seuils 20 – 50 – 100 – 200  
ng TEQ/kg ms



Classe de teneur la plus probable  
(ng TEQ/kg ms)

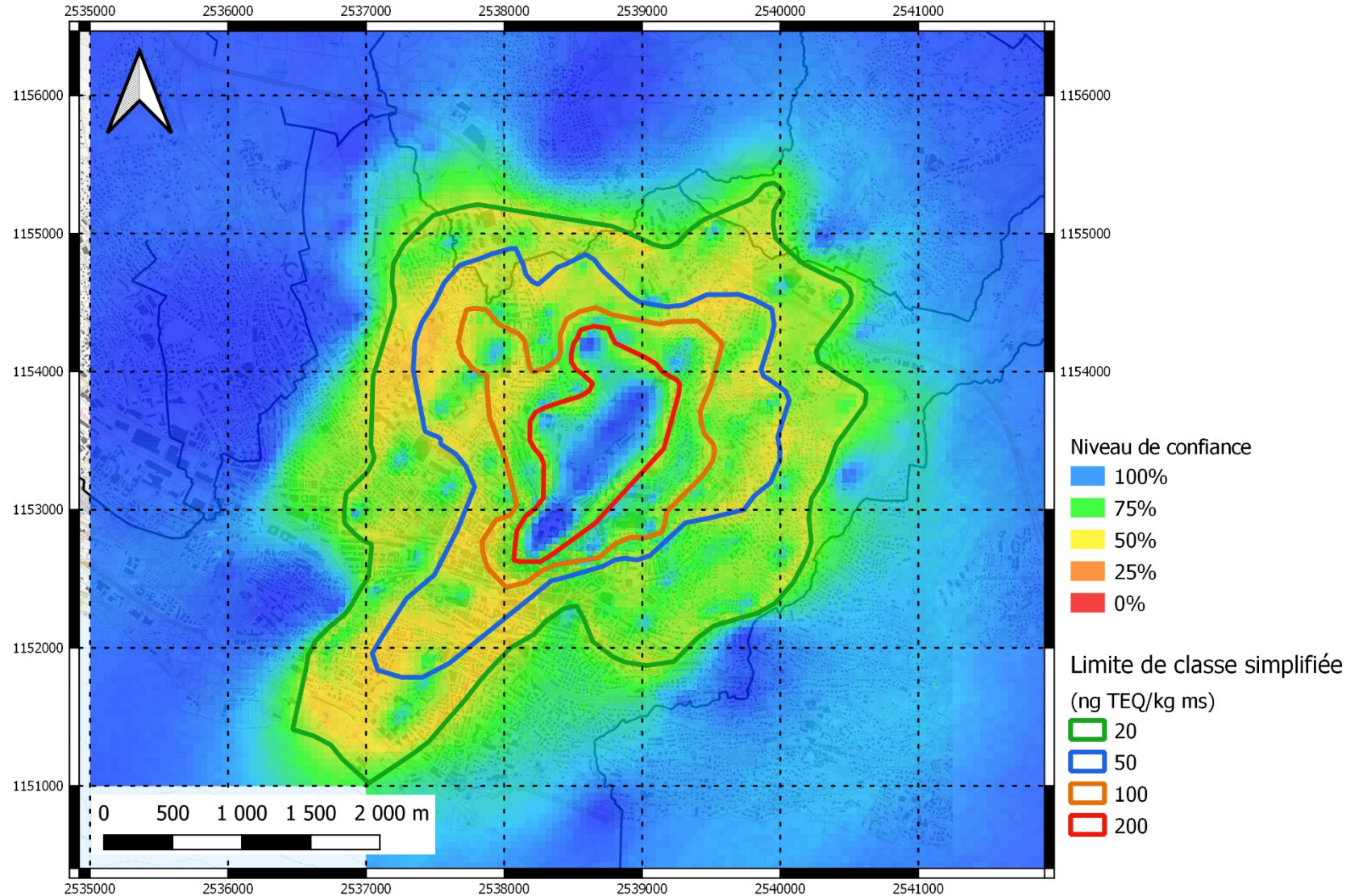
- 20-50
- 50-100
- 100-200
- >200

Limite de classe simplifiée  
(ng TEQ/kg ms)

- 20
- 50
- 100
- 200

# CARTE RETENUE PAR LE CANTON

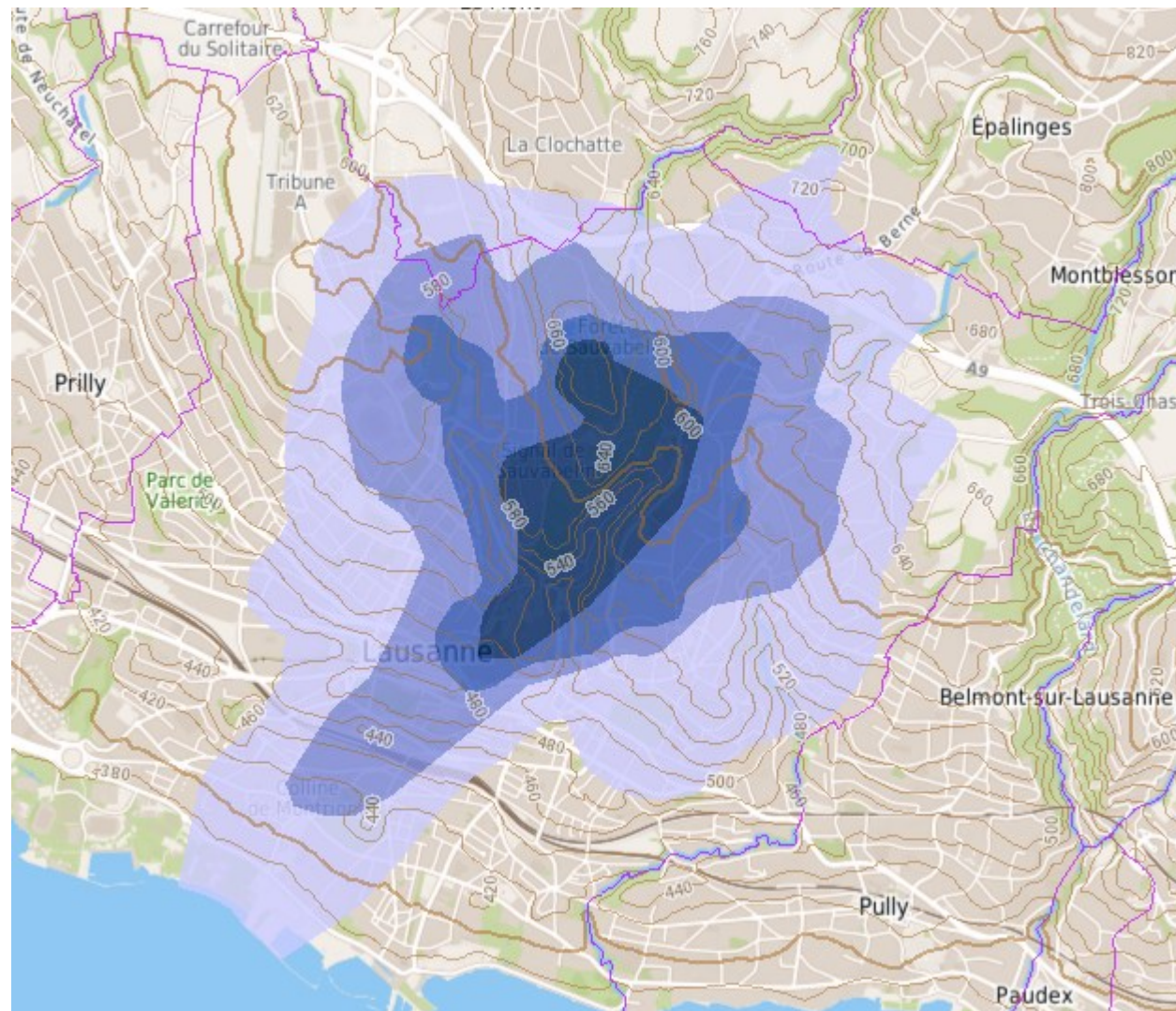
Niveaux de confiance associés



# PREMIÈRE CARTE DE RECOMMANDATIONS SANITAIRES PUBLIÉE PAR LE CANTON EN OCTOBRE 2021

Teneurs	Recommandations sanitaires
20 - 50	1 œuf / semaine max 100g cucurbitacées / semaine max
50 - 100	0 œuf / semaine 100g cucurbitacées / semaine max Peler les légumes racines
100 - 200	0 œuf / semaine 100g cucurbitacées / semaine Peler les légumes racines
> 200	0 œuf / semaine 100g cucurbitacées / semaine Peler les légumes racines Eviter l'ingestion de terre dans les parcs et jardins

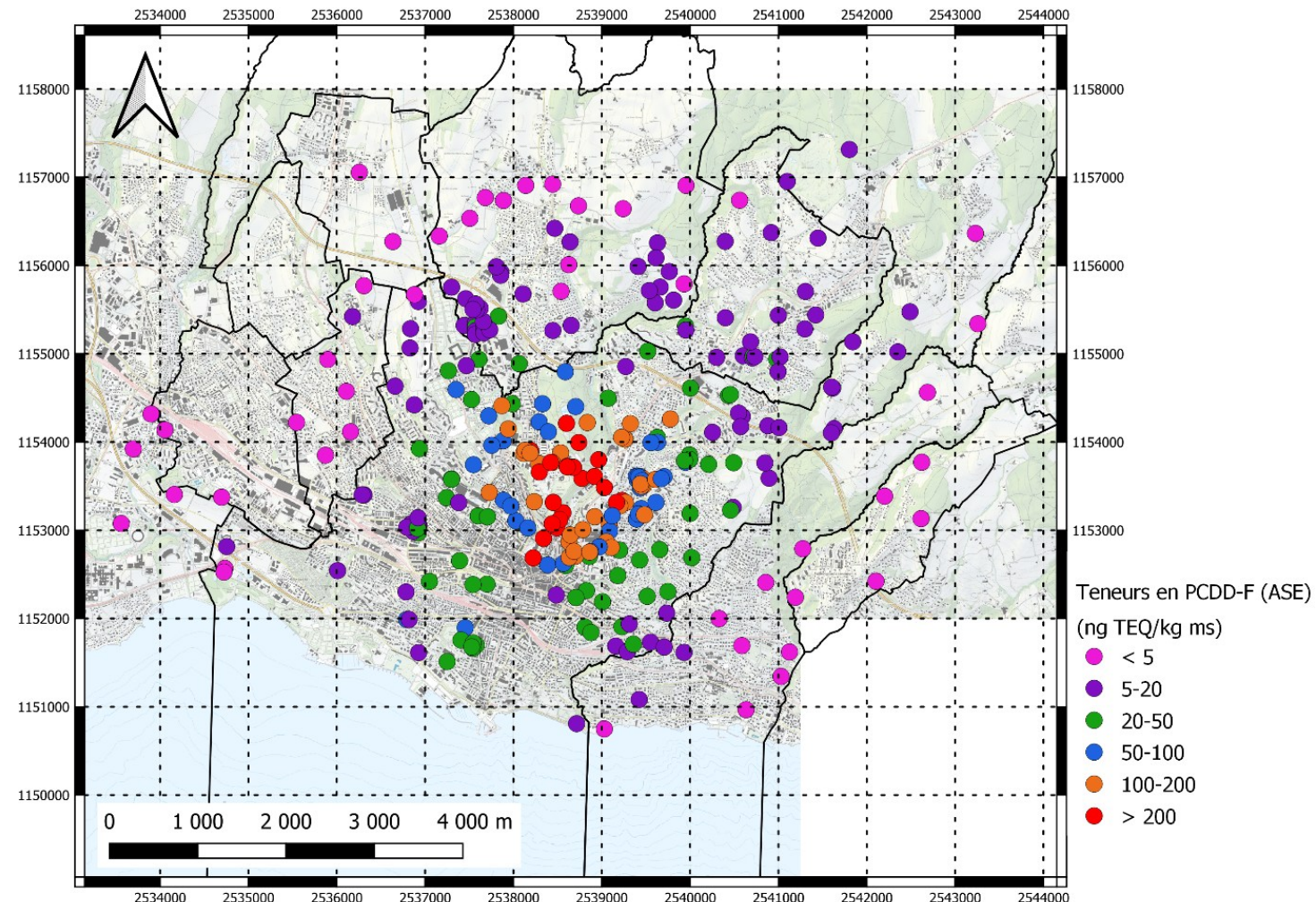
Teneurs en PCDD-F en ng TEQ/kg ms



# PROCESSUS RÉPÉTÉ EN 2022

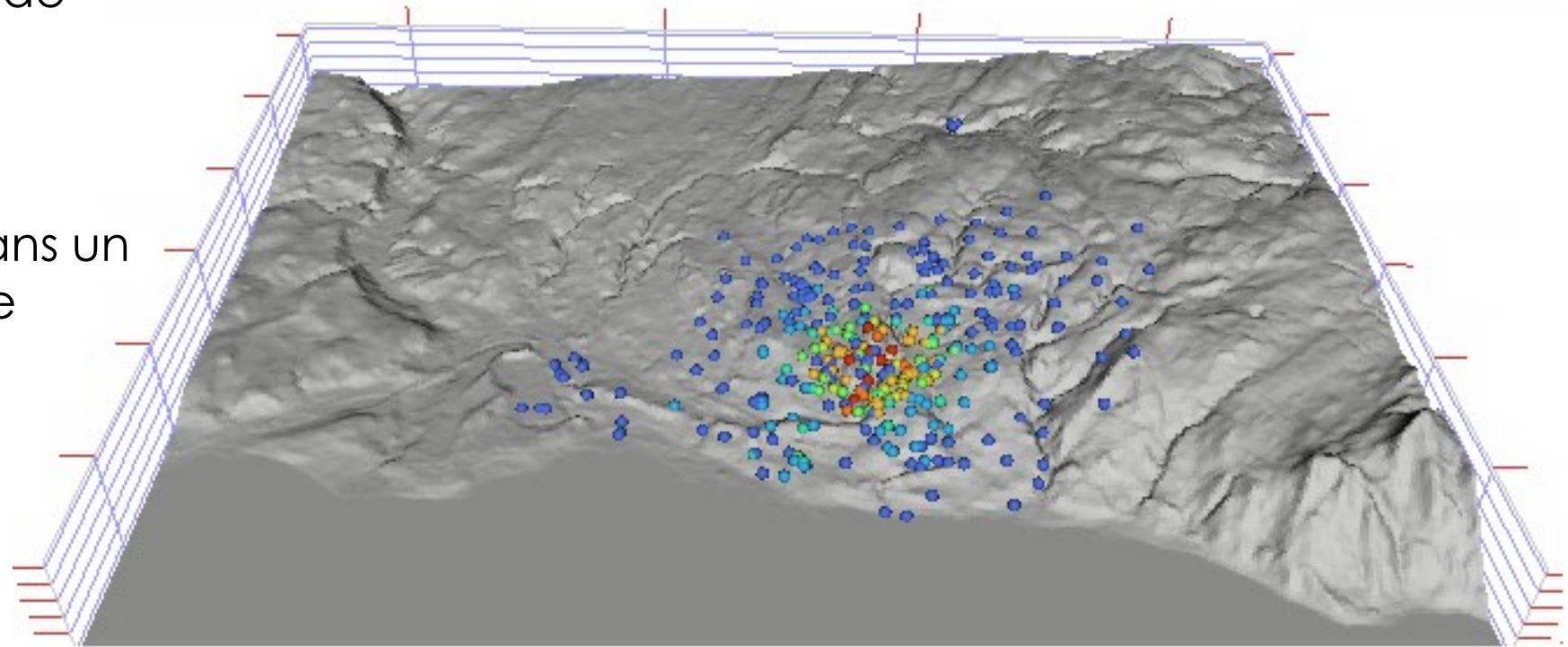
- Recherche de la limite à 5 ng TEQ / kg ms en PCDD-F
- 304 échantillons disponibles

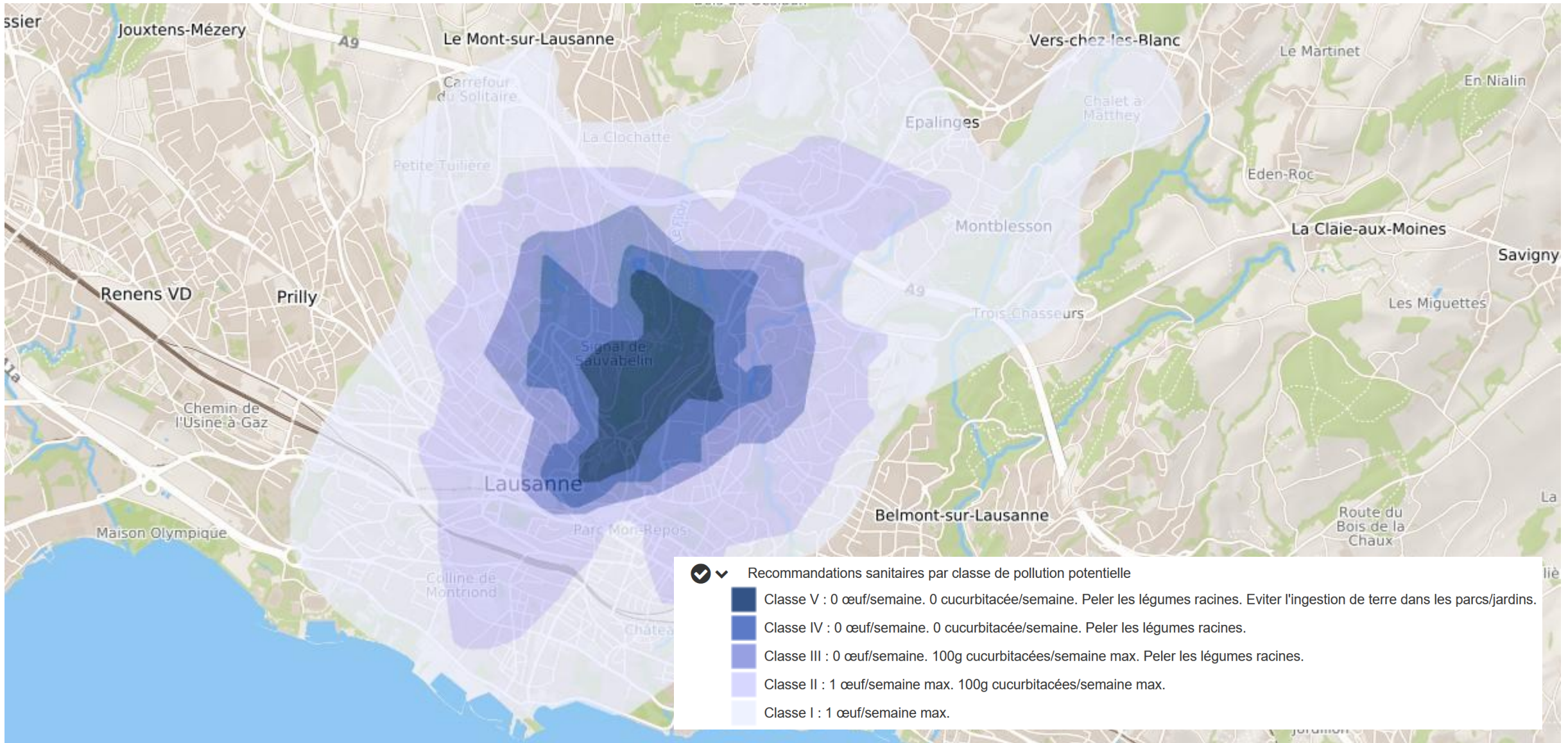
	PCDD-F
<b>Nb.</b>	<b>304</b>
Min	0.1
Max	640
<b>Moy.</b>	<b>64</b>
$\sigma$	102
P5%	1
P50%	21
P95%	246



# AJUSTEMENT DES CONDITIONS DE MODÉLISATION

- Même effet du relief sur la répartition des teneurs
- Effet des vents dominants moins marqué à grande distance du foyer de pollution
- Mêmes conditions de modélisation, mais dans un variogramme isotrope






# CONCLUSION

## A RETENIR

- L'effet du relief et des vents sur la répartition spatiale de la pollution a été capté par le modèle géostatistique, et des variables secondaires ont pu être utilisées pour réduire l'incertitude.
- En utilisant une approche par simulation, les cartes ont pu être adaptées en cours de route, en fonction de l'évolution des objectifs.

## ON PEUT ALLER PLUS LOIN

- Il est possible de coupler les calculs de transport et d'exposition sanitaire, avec la cartographie, pour « traduire » directement les cartes de pollution en cartes des risques sanitaires, et les spatialiser →  CARTORISK
- Utilisations possibles de la géostatistique dans les études épidémiologiques → relations spatiales santé-environnement.

**REMERCIEMENTS AU  
CANTON DE VAUD  
POUR NOUS AVOIR  
AUTORISÉ À PRÉSENTER  
CES RÉSULTATS.**

[helenedemougeotrenard@eode.ch](mailto:helenedemougeotrenard@eode.ch)  
[baptistesauvaget@eode.ch](mailto:baptistesauvaget@eode.ch)

## QUELQUES RÉFÉRENCES

Vernez, David, Christelle Oltramare, Baptiste Sauvaget, Hélène Demougeot-Renard, Lothar Aicher, Nicolas Roth, Isabelle Rossi, et al. 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. doi:10.1016/j.envpol.2022.120441.

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.

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.

Unisanté. 2022. *Dioxines/furanes en région lausannoise – Évaluation sanitaire*. Centre universitaire de médecine générale et santé publique (Unisanté). doi:10.16908/ISSN.1660-7104/325.