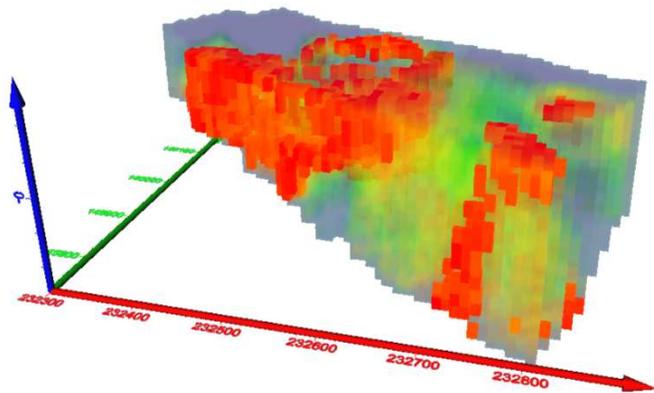




Jeudi 8 novembre 2018

La géostatistique en appui à la gestion des sites pollués.

Dimitri D'Or, Ephesia Consult

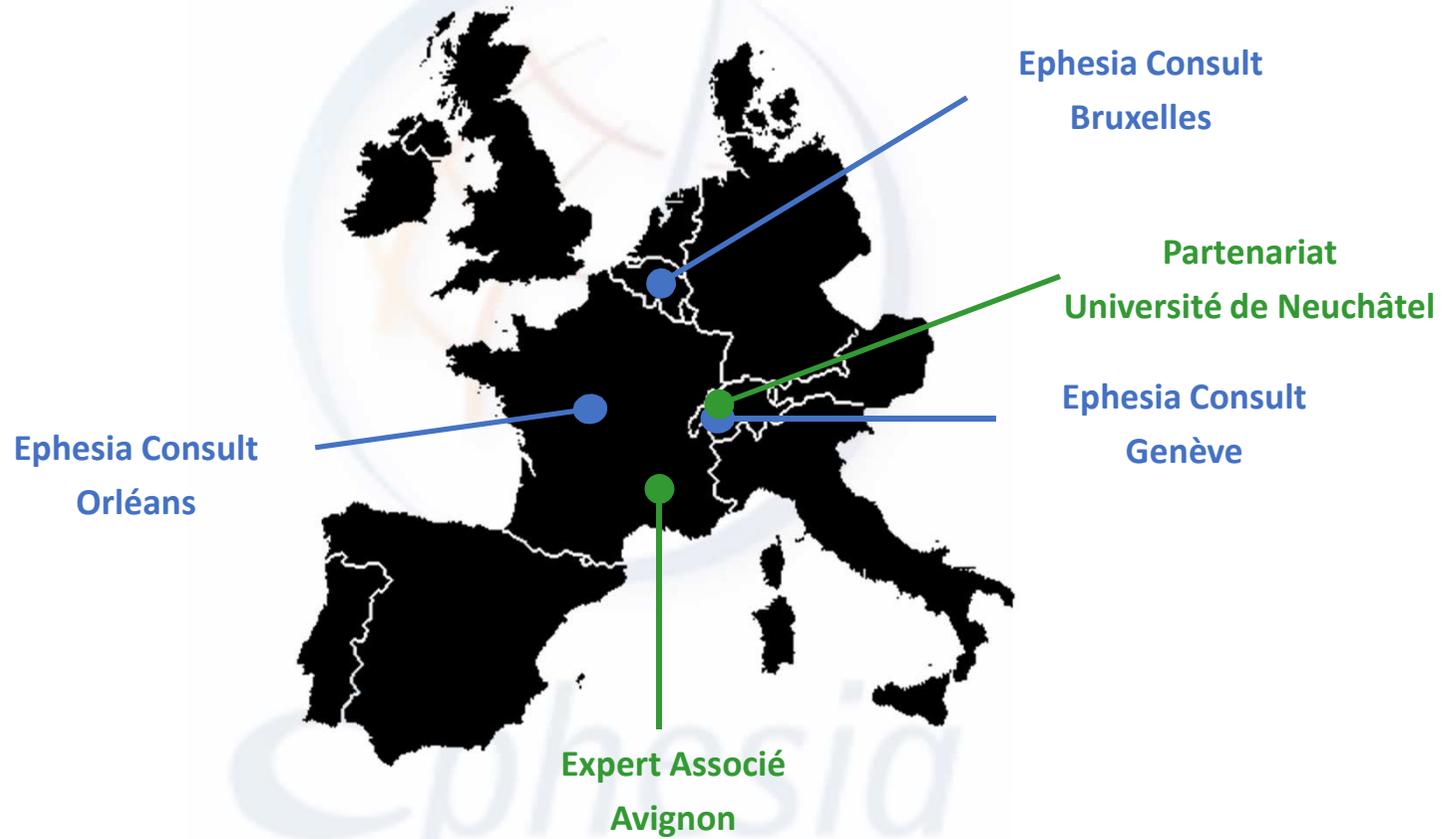


Présentation de Ephesia Consult

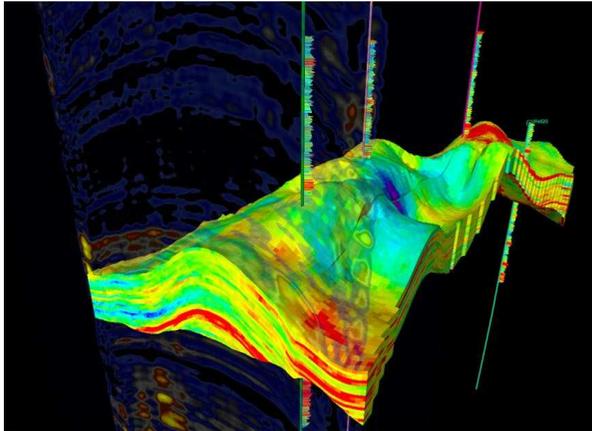
Ephesia



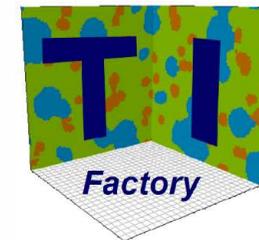
Réseau d'experts



Oil and Gas



- Développement de logiciel à façon
- Production de plug-ins commerciaux



Software design

R&D

Géostatistiques

Statistiques

Incertitudes

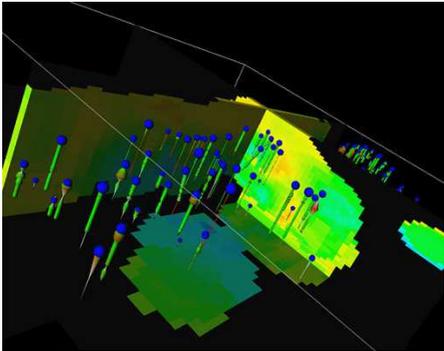
Multi-points

Simulations pseudo-génétiques

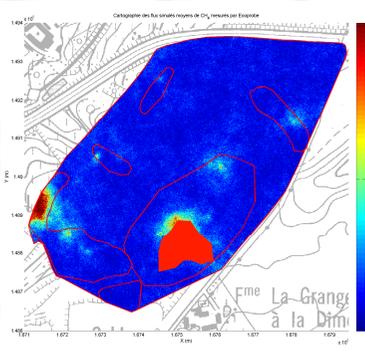
Développés en collaboration avec l'équipe du Pr. Ph. Renard (Université de Neuchâtel, Suisse)

Environnement

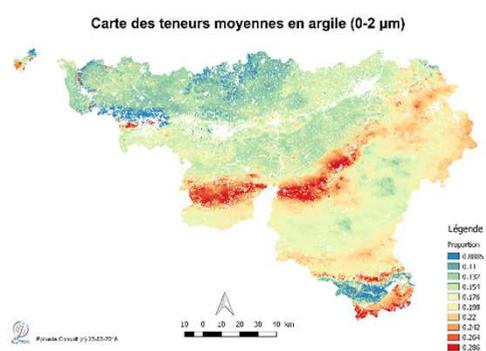
Pollution des sols



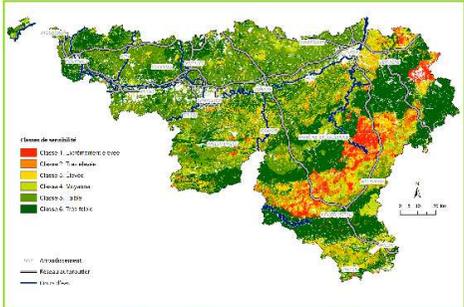
Emissions de biogaz



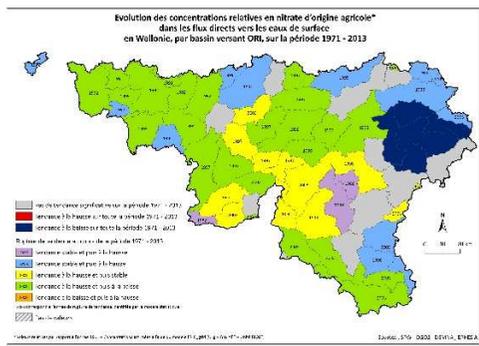
Texture des sols



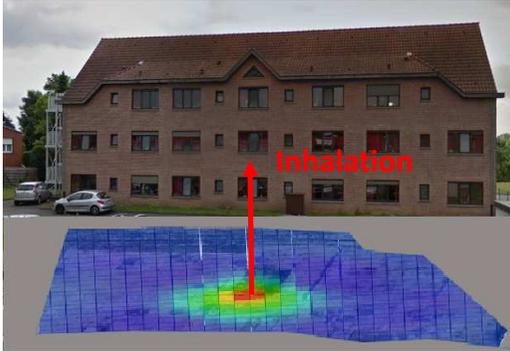
Compaction des sols



Concentrations en nitrates



Cartographie des risques sanitaires



Denis Allard et Dimitri D'Or sont co-inventeurs de 4 brevets

PCT/FR2009/052301

MODELE MULTINOMIAL SPATIALISE (FR / PCT / USA)

PCT/FR2012/050492

KRIGEAGE EFFICACE (FR / PCT / USA)

PCT/EP2013/057743

TRUNCATION DIAGRAM DETERMINATION FOR A PLURI-GAUSSIAN ESTIMATION (CBE / PCT)

PCT/FR2014/053068

MAPPING A GEOLOGICAL PARAMETER ON AN UNSTRUCTURED GRID (PCT)

Publications scientifiques

- ✓ Volonté de publier régulièrement dans de grands journaux scientifiques (ref. récentes)
 - Benoit N., Marcotte D., Boucher A., D'Or D., Bajc A. and Rezaee H. **2017**. Directional hydrostratigraphic units simulation using MCP algorithm. Stoch. Environ. Res. Risk Assess. <https://doi.org/10.1007/s00477-017-1506-9>
 - D'Or D. and Destain M.F. **2014**. Toward a tool aimed to quantify soil compaction risks at a regional scale: Application to Wallonia (Belgium), Soil and Tillage Research, 144, 53-71.
 - Straubhaar J., Renard, P., Mariethoz G., Froidevaux R. and Besson O. **2011**. An improved parallel multiple-point algorithm using a list approach. Mathematical Geosciences, 43(3), 305-328.
 - Allard D., D'Or D. and Froidevaux R. **2011**. Estimating and Simulating Spatial Categorical Data Using an Efficient Maximum Entropy Approach. European Journal of Soil Science, 62(3), 381-393

- ✓ Participations régulières à des conférences scientifiques:
 - Gussow Conference: 10/2018, Lake Louise (Canada): 1 pres. + 1 poster
 - International Geostatistics Conference: 09/2016, Valencia (Espagne): 1 pres. + 1 poster
 - Geostatistics for the Environment: 07/2016, Lisbonne (Portugal)
 - Petroleum Geostatistics: 09/2015, Biarritz (France): 3 pres.
 - Geostatistics for the Environment: 07/2014, Paris (France): 2 pres.
 - Geostatistics for the Environment: 09/2012, Valencia (Espagne) : 2 pres.
 - International Geostatistics Conference: 06/2012, Oslo (Norvège): 4 pres.
 - ...

Contenu de l'exposé

- Concepts
- Conditions d'utilisation
- Retours d'expérience
- Un cas d'application
- Lien avec les études de risques
- Conclusions

Géostatistique pour les sites contaminés

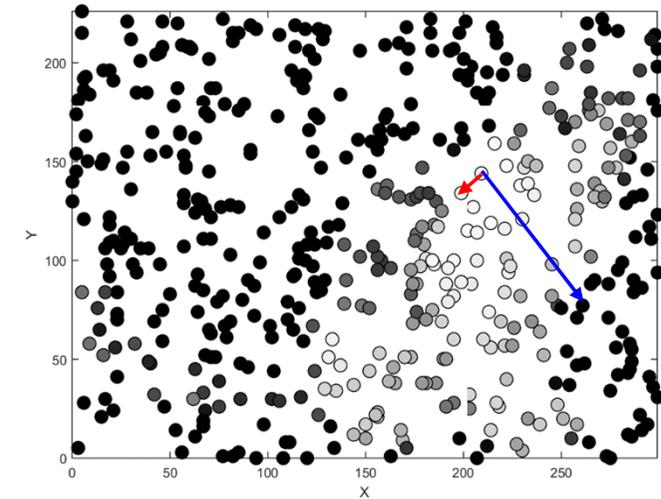
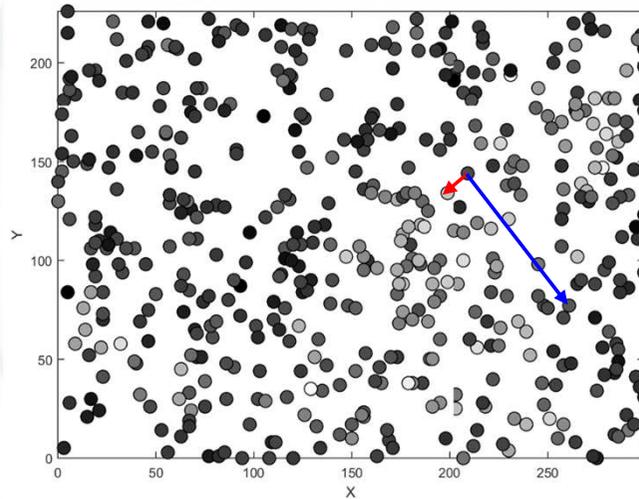
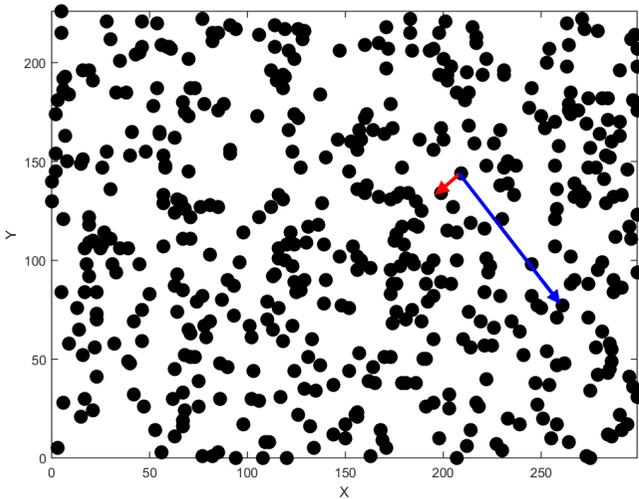
- Concepts

Considérons un site pollué hypothétique

Situation 1

Situation 2

Situation 3



Constante

Peu structurée (dépôt atmosphérique)

Bien structurée (source ponctuelle)

L'information disponible est toujours limitée

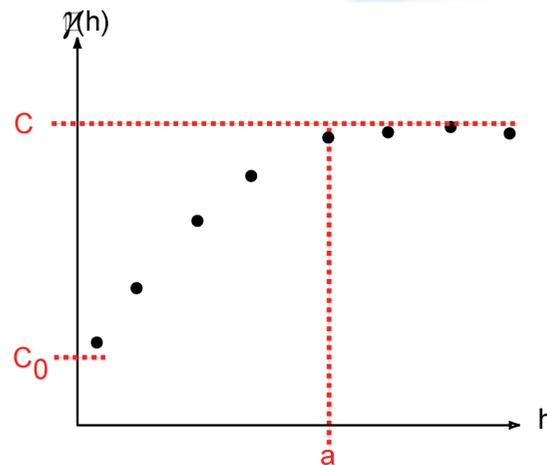
Stratégie 1 : densifier l'échantillonnage

Notion de corrélation spatiale

UX

Stratégie 2 : Utiliser des outils mathématiques et statistiques = modèle probabiliste

Outil de mesure de la corrélation spatiale : le variogramme

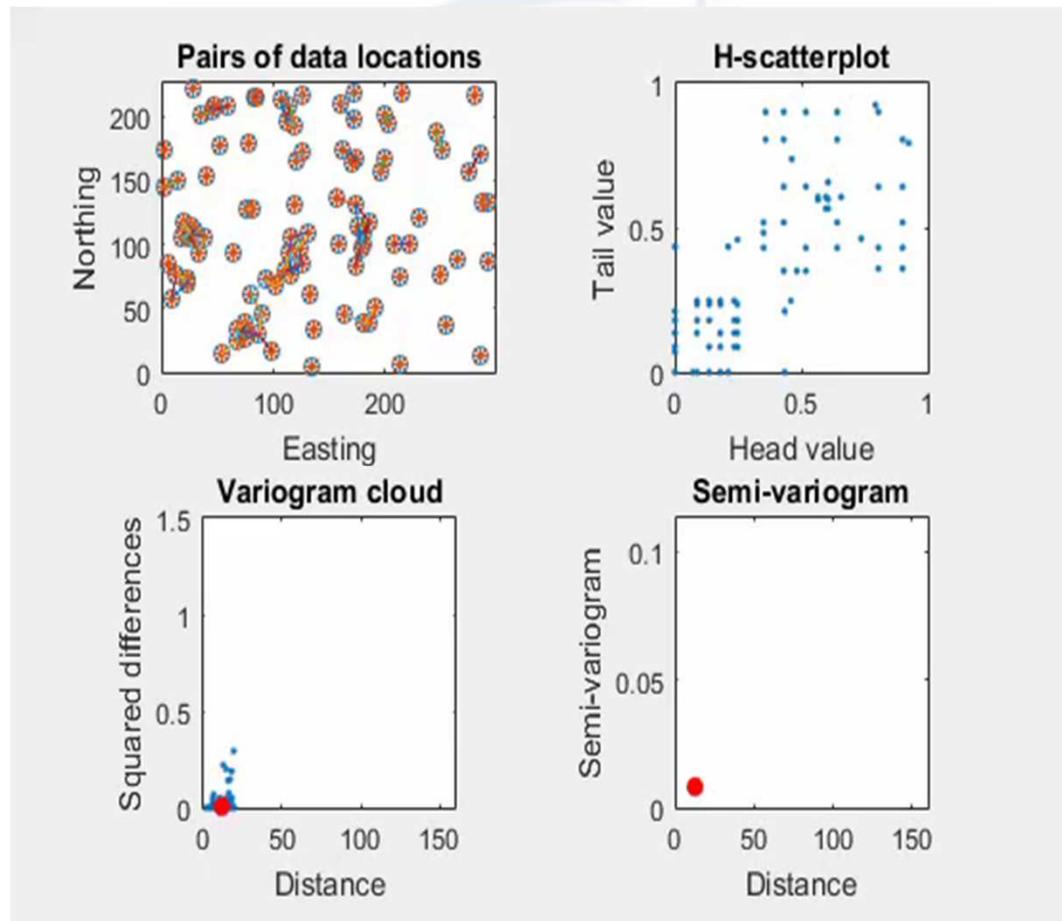


$$2\gamma(h) = E[(Z(x_i + h) - Z(x_i))^2]$$

$$\gamma_{\text{exp}}(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_1^n [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2$$

- h Lag*** = distance de séparation
- C Seuil*** = plateau atteint par la variance
≈ variance générale des données
- a Portée*** = distance à laquelle le variogramme atteint le plateau
= "distance de corrélation "
- C₀ Effet de pépite*** = variabilité à courte distance et erreur de mesure

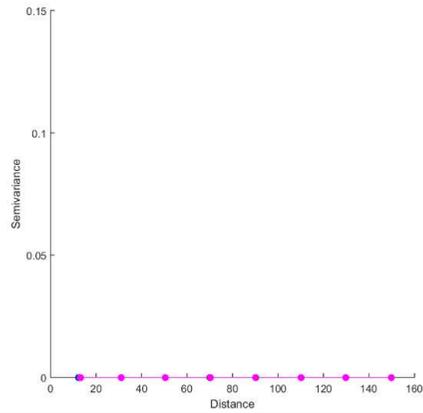
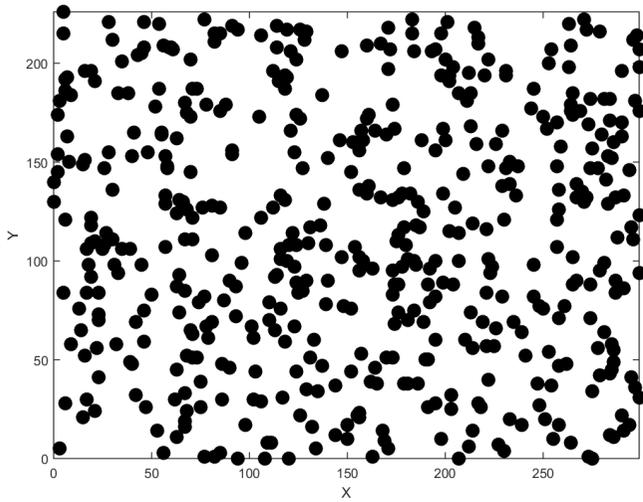
Outil de mesure de la corrélation spatiale : le variogramme



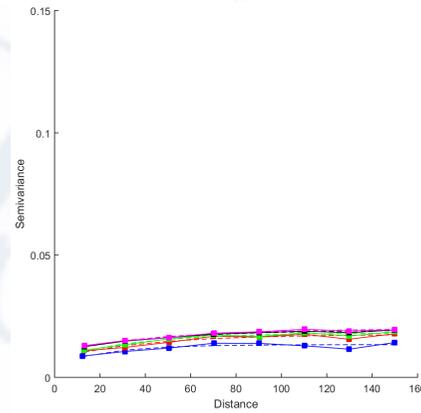
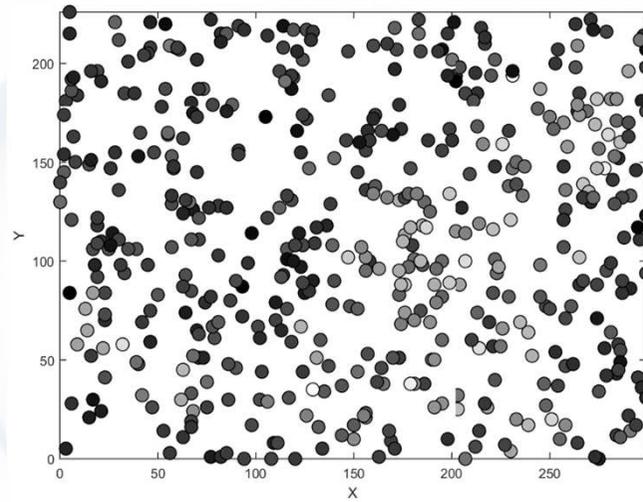
$$(Z(x_i + h) - Z(x_i))^2$$

$$\gamma_{\text{exp}}(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_1^n [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2$$

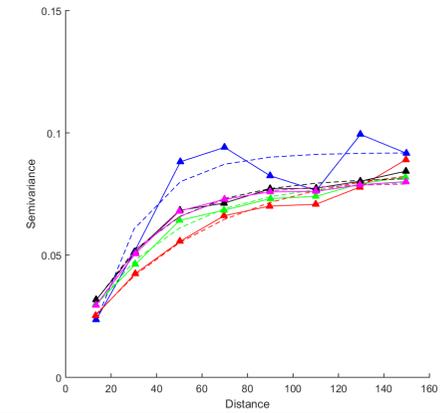
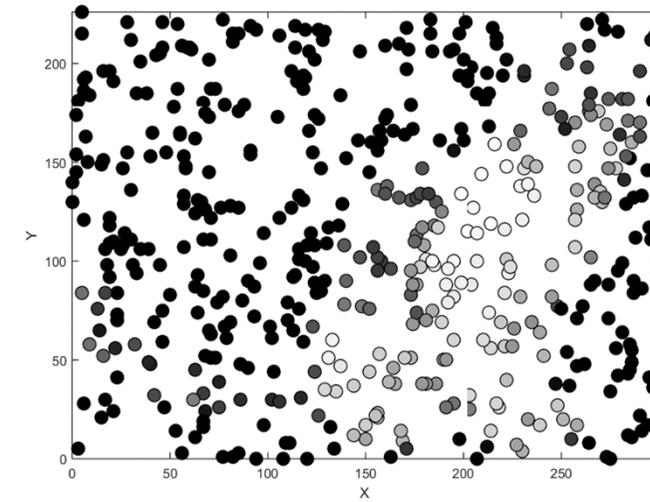
Situation 1



Situation 2



Situation 3



Le problème fondamental :

Comment estimer une variable
à un endroit où elle n'a pas été mesurée ?

Idée :

Se servir de la notion de corrélation spatiale

Cartographie et estimation

Plus proche voisin

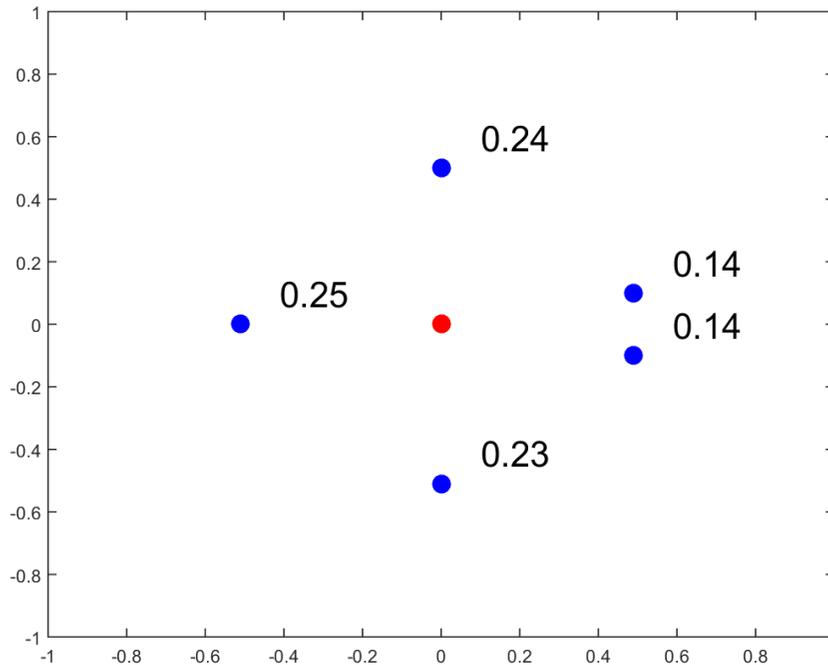
- Le point le plus proche reçoit un poids de 1

Distance inverse

- Le poids est proportionnel à l'inverse de la distance élevée à une puissance donnée

Krigeage

- Estimateur linéaire prenant en compte la **corrélacion spatiale**
- Estimateur **sans biais** : l'erreur est nulle, en moyenne
- **Meilleure précision** : minimise la variance de l'erreur d'estimation
- **Associé à une variance de krigeage** ⇒ information sur l'incertitude locale

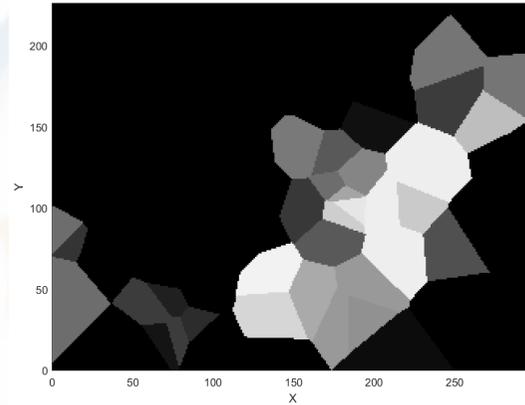
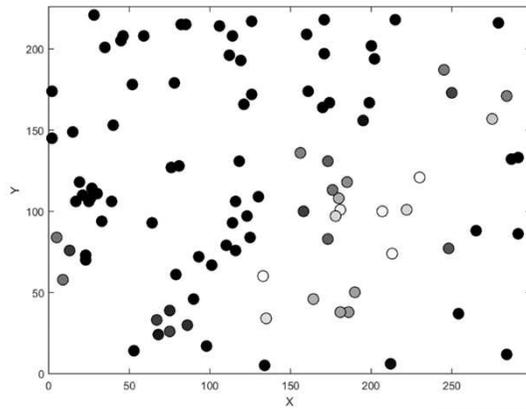


$$z_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i$$

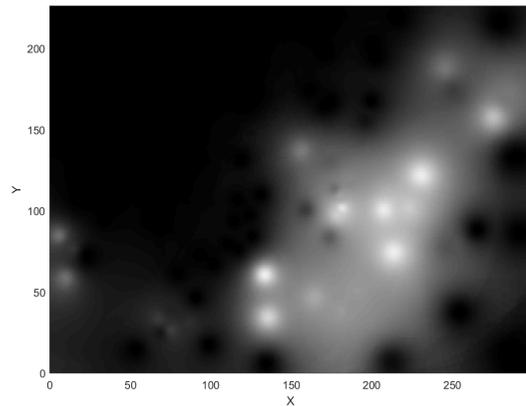
Cartographie et estimation

Plus proche voisin

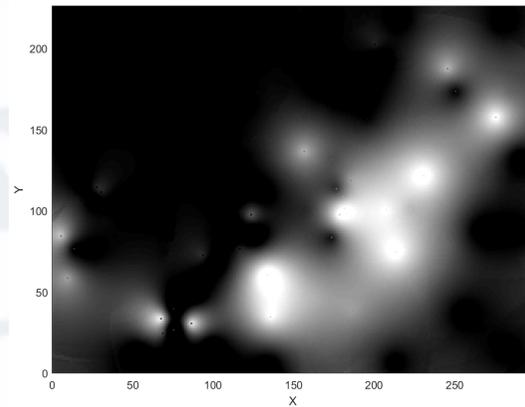
Situation 3



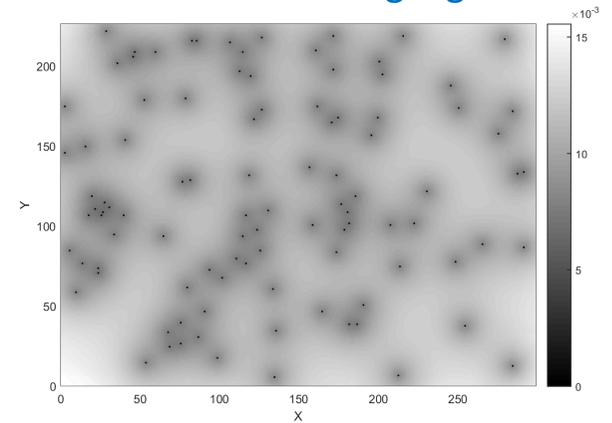
Distance inverse



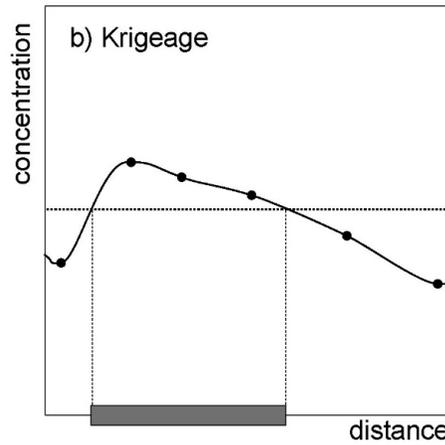
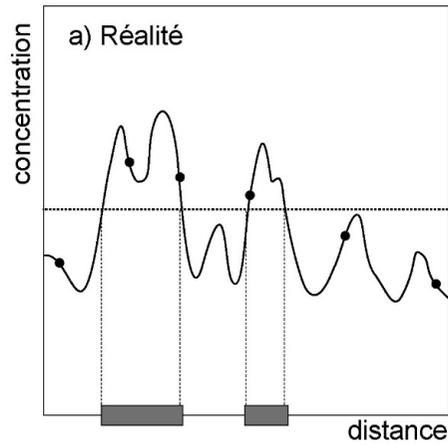
Krigeage



Variance de krigeage



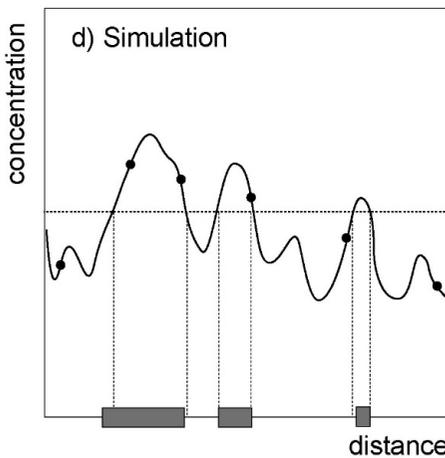
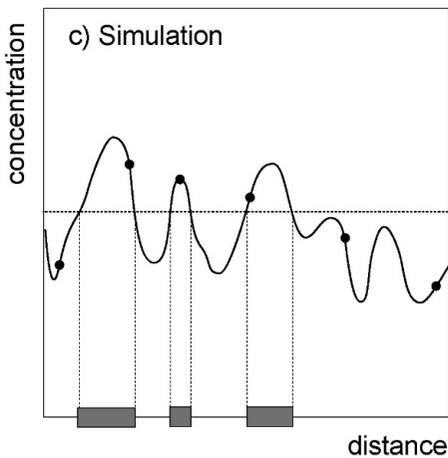
Simulations conditionnelles



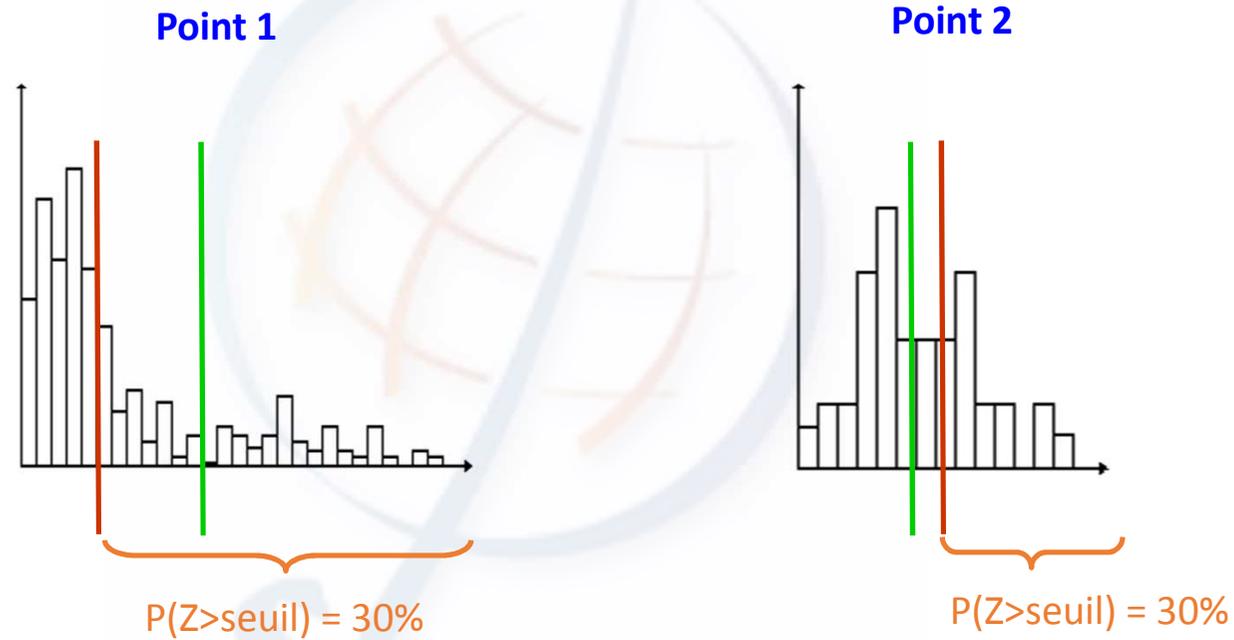
légende:

- échantillon
- seuil de concentration
- zone à dépolluer

Krigeage inadapté au problème de dépassement de seuil



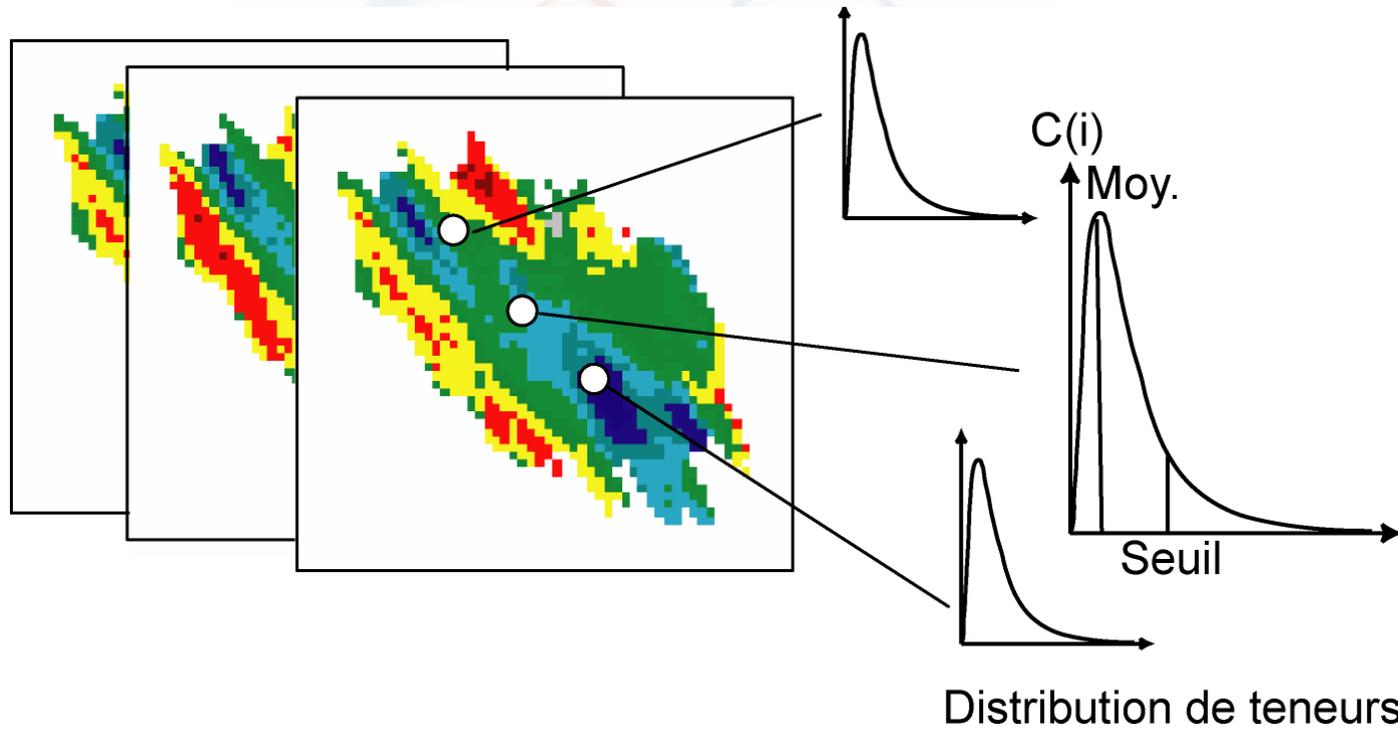
Simulation vs Estimation



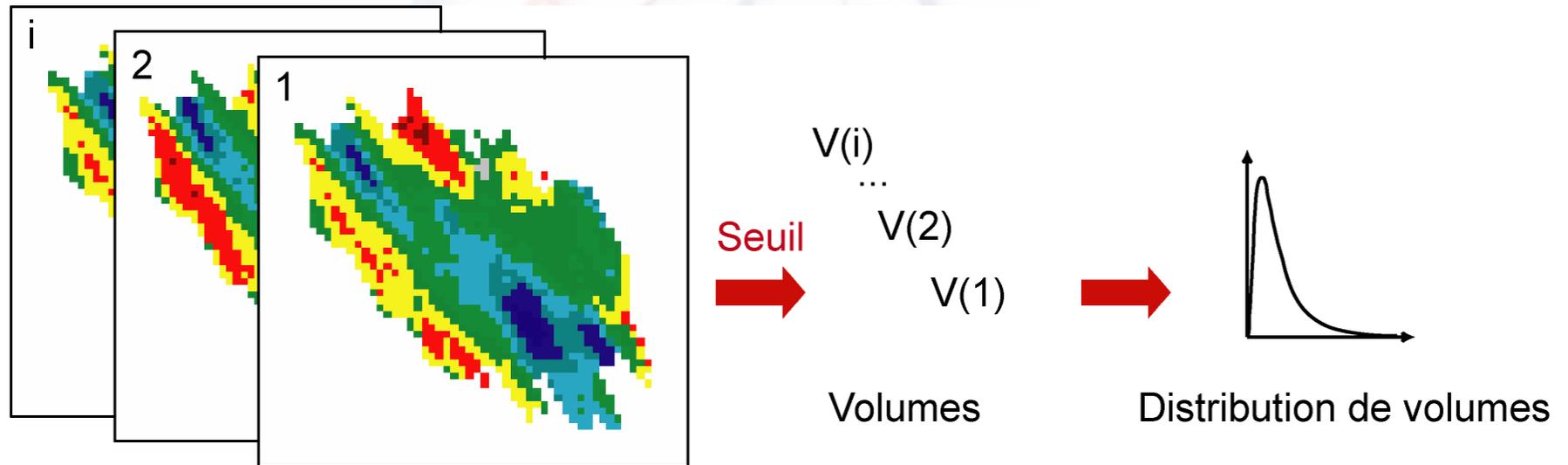
Seuil

Moyenne (par krigeage)

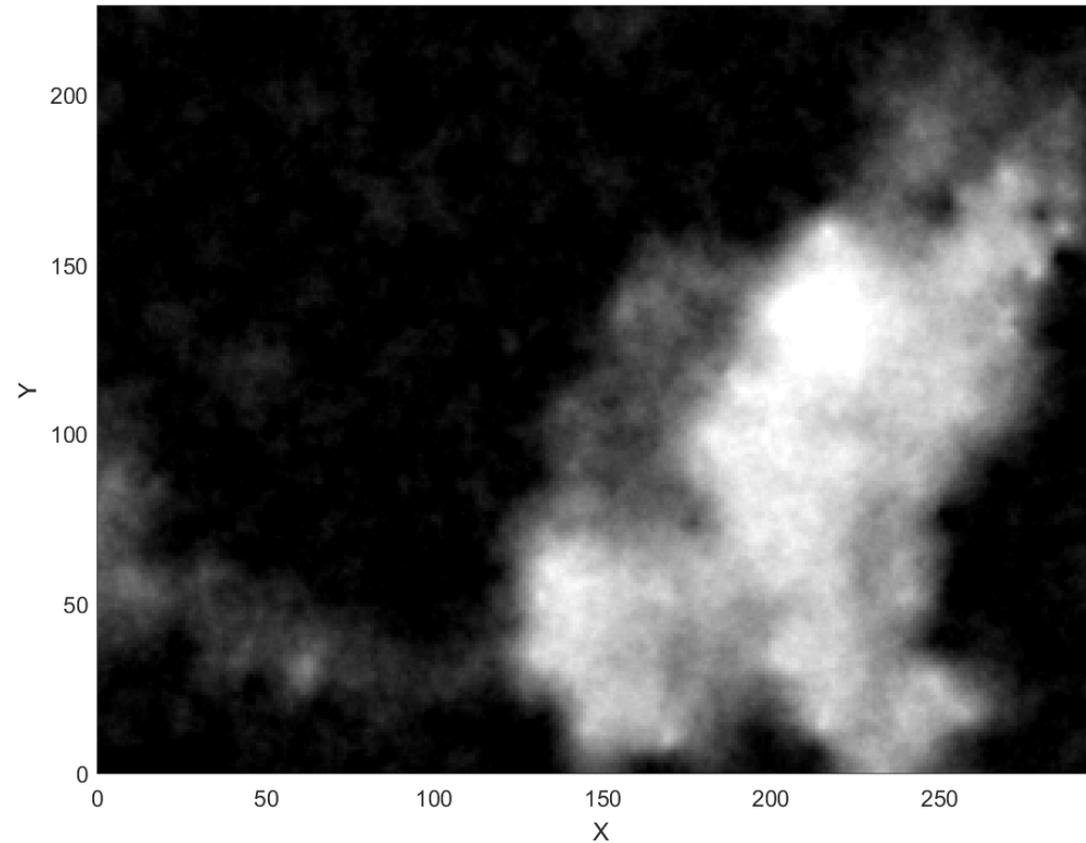
Analyse par maille et incertitude sur les teneurs
(locale)



Analyse par réalisation et incertitude sur les volumes
(globale)



Simulation séquentielle Gaussienne



Simulation 1

Simulation 2

Simulation 3

Simulation 4

Simulation 5

Simulation 6

Simulation 7

Simulation 8

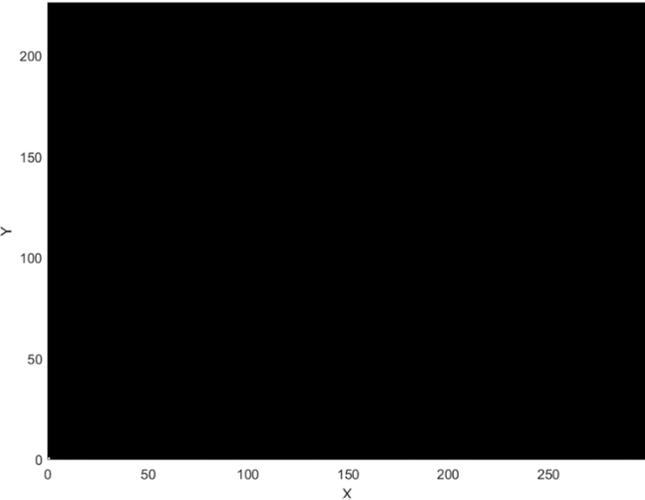
Simulation 9

Simulation 10

Moyenne sur 10 réalisations

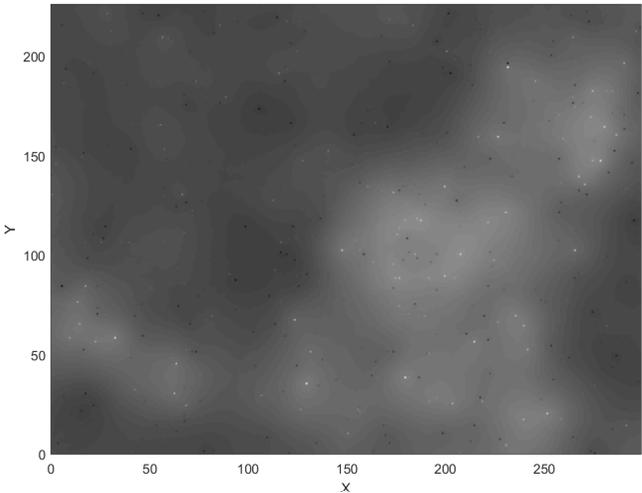
Situation 1

Constante



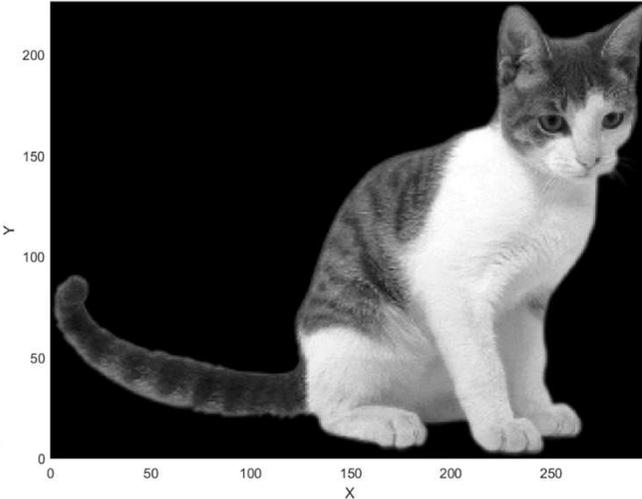
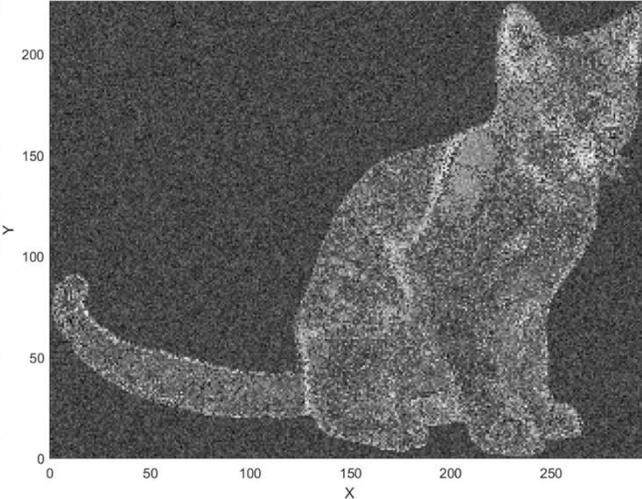
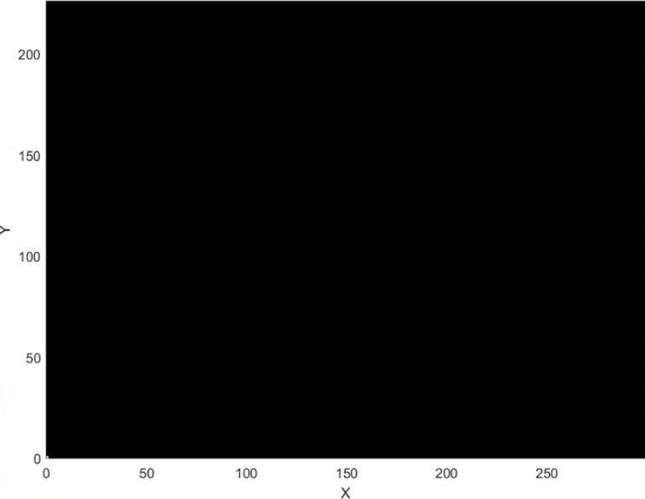
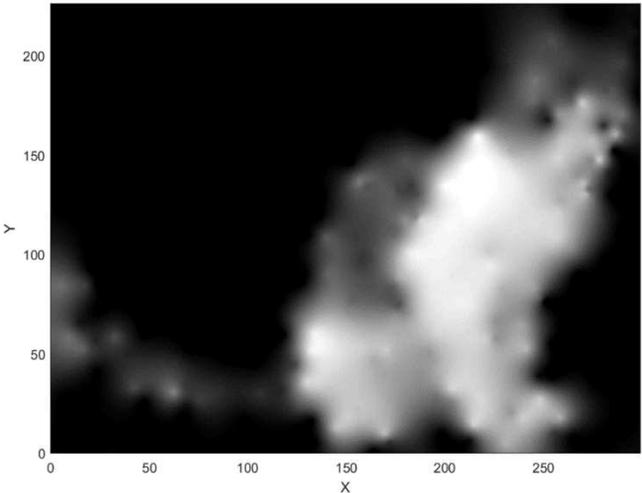
Situation 2

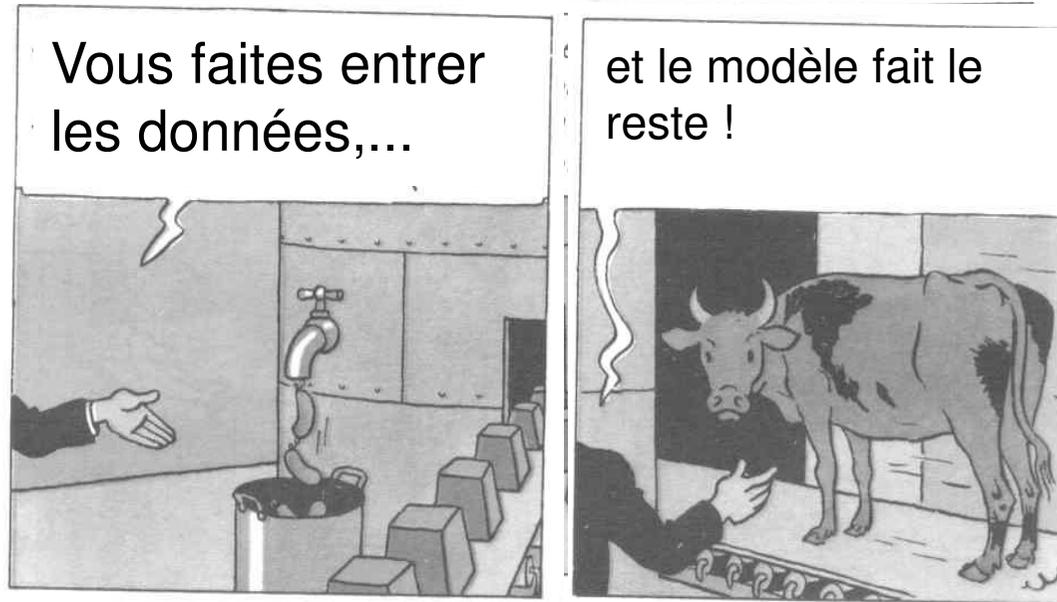
Peu structurée



Situation 3

Bien structurée





Extrait de Tintin en Amérique - Hergé

Un modèle n'est jamais la réalité...
mais il aide à objectiver la démarche et les interprétations !

Géostatistique pour les sites contaminés

-

Conditions d'utilisation

Quelles données ?

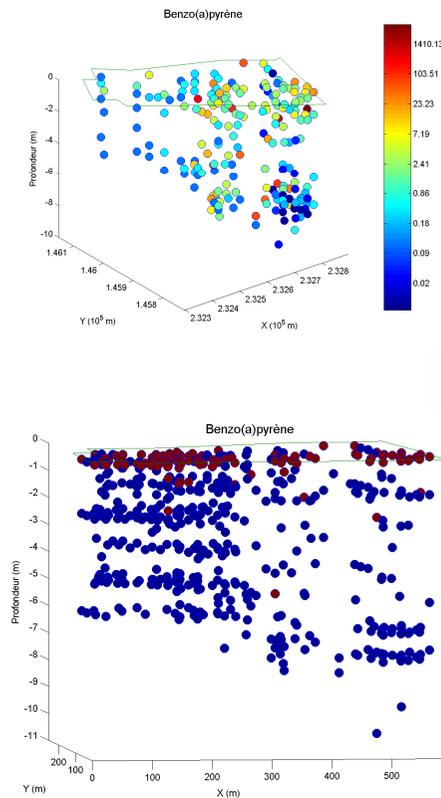
	Données directes	Données indirectes
Données quantitatives	Concentrations mesurées en labo	Concentrations mesurées sur le terrain (XRF, etc.) Géophysique pH
Données qualitatives		Lithologie, Profils microbiens, Couleur

Variable d'intérêt

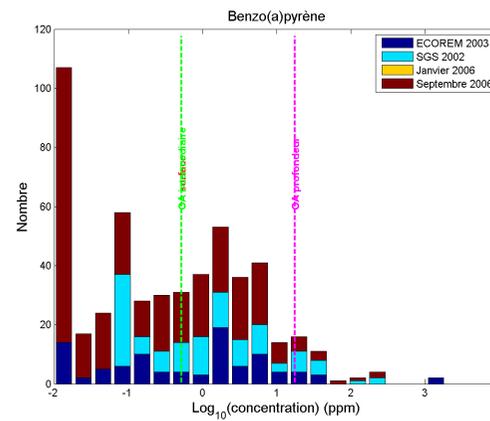
Données auxiliaires

+ Capacité de gérer des seuils variables en 3D selon l'affectation future et la profondeur

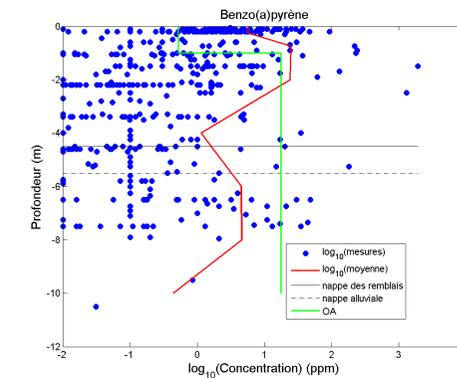
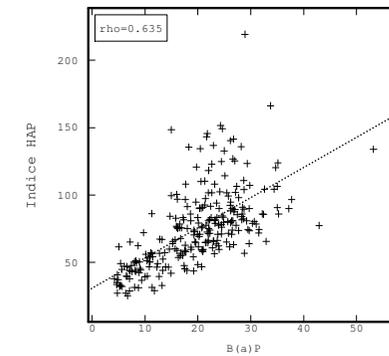
Analyse exploratoire des données



Cartographie des données



Statistiques sur les concentrations et interprétations



Relations et corrélations entre polluants et avec d'autres variables

Quand utiliser la géostatistique ?

Objectifs

- *Cartographie*
- *Optimisation de l'échantillonnage*
- *Valorisation de toutes les données*
- *Délimitation et évaluation des zones à dépolluer*
- *Évaluation des coûts de réhabilitation et des risques financiers*

Phases



Quand utiliser la géostatistique ?

Tableau 16 : Relation entre objectif d'étude, nombre de données nécessaires, type d'approche géostatistique et coût/temps associé.

Objectif	Nb. min de données sur la variable d'intérêt	Approche géostatistique	Coût/temps
Contrôle qualité et synthèse des données	~10-15	Outils de base : <ul style="list-style-type: none"> • statistiques élémentaires, • histogrammes, • corrélations, • cartes de points renseignés. 	Quelques heures
Cartographie de la pollution	> 20	<ul style="list-style-type: none"> • Interpolation déterministe ou par krigeage, • Se méfier de l'interprétation de certaines cartographies, • Communiquer sur les incertitudes sous-jacentes quand peu de données. 	Quelques heures, usuellement intégrées dans la prestation du bureau d'étude
Estimation des volumes contaminés	> 25-30 (>3-4/sondages)	<ul style="list-style-type: none"> • Estimation des tonnages contaminés et des incertitudes associées, classification des terres, • Optimisation d'investigations complémentaires pour réduire les incertitudes 	Quelques jours à quelques semaines, Prestation individualisée

Source : **RECORD**, Retour d'expérience critique sur l'utilisation de méthodes géostatistiques pour la caractérisation des sites et sols pollués, 2013, 135 pages, n°11-0514/1A

Quand utiliser la géostatistique ?

Taille des sites :

- Pas intéressant pour les petits sites : dépollution tout ou rien, peu de risque financier
- Grands sites : analyse statistique toujours intéressante, surtout avec beaucoup de données
 - ✓ Valorisation des données disponibles et du budget important consacré à leur récolte
 - ✓ Impossibilité d'avoir une vue d'ensemble objective
 - ✓ Information non exhaustive

Cadre légal

- Ordonnance du 5 mars 2009 portant sur la gestion et l'assainissement des sols pollués.
- Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale déterminant les **normes d'intervention et les normes d'assainissement** du 17/12/2009 : la géostatistique peut prendre en compte les normes appropriées selon la position horizontale et verticale de chaque maille du site.
- La **géostatistique est citée explicitement parmi les méthodes préconisées** pour la délimitation des zones polluées dans l'arrêté fixant le contenu des reconnaissances de l'état du sol et des études détaillées du 08/07/2010.
- La géostatistique peut être utilisée pour fournir les concentrations prises en compte dans **l'étude de risque** (cf. Projet d'arrêté du 01/09/2010 fixant le contenu d'une étude de risque ainsi que la méthodologie d'évaluation des risques et de calcul des valeurs de risque). D'autres procédures statistiques (Monte-Carlo) peuvent être mises en œuvre pour **quantifier les incertitudes** sur les niveaux de risque.

Cadre légal en Région Wallonne

- Décret relatif à la gestion des sols du 5 décembre 2008.
- Dans le Guide de référence pour l'étude de caractérisation (GREC-V02), la géostatistique est recommandée au point 2.2.2.C.5. pour caractériser des taches de pollution.

5 clés pour la réussite de l'utilisation de la géostatistique

1. La **prévoir** dès le début des investigations
2. Bien **définir les objectifs** des étapes où la géostatistique sera utilisée
3. Prendre le temps de faire une **bonne analyse statistique exploratoire**
4. **Prendre conseil** – Attention aux solutions toutes faites
5. **Garder son esprit critique** : le modèle n'est pas la réalité

Géostatistique pour les sites contaminés

-

Retours d'expérience

Quelles sont les « performances » de la géostatistique ?

- Idéalement, on aimerait confronter les volumes prédits aux volumes réellement traités
- Les retours sont encore très rares faute d'information après les travaux

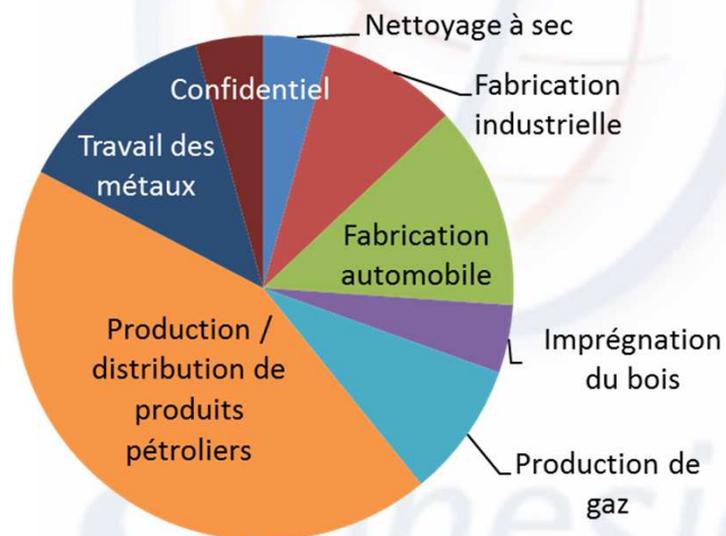
➡ Etude réalisée publiée en mai 2016 par le réseau RECORD (www.record-net.org) en France

Quelles sont les « performances » de la géostatistique ?

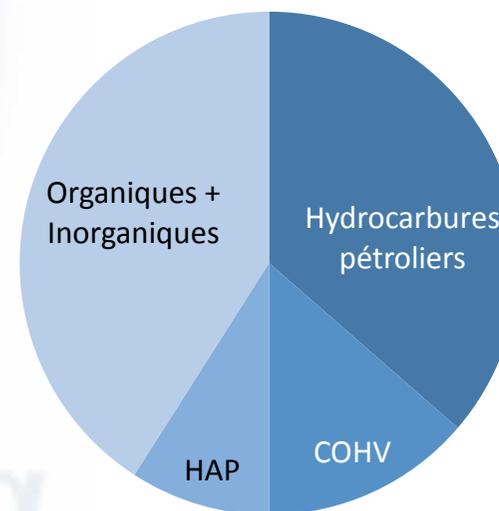
Typologie des 23 sites

Une grande diversité de situations de pollution

➔ Types d'activités



➔ Types de substances



projet RECORD

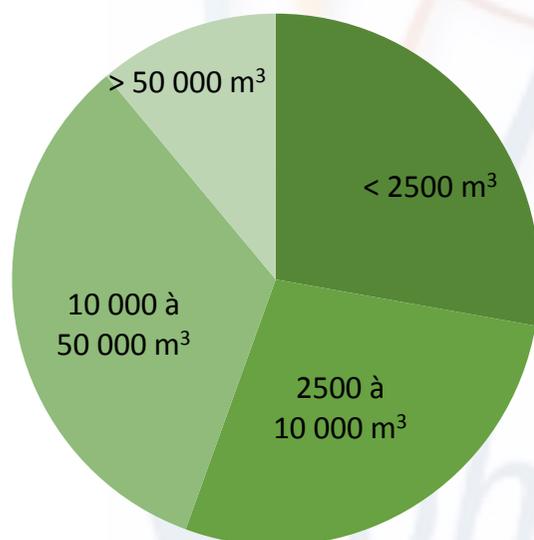


Quelles sont les « performances » de la géostatistique ?

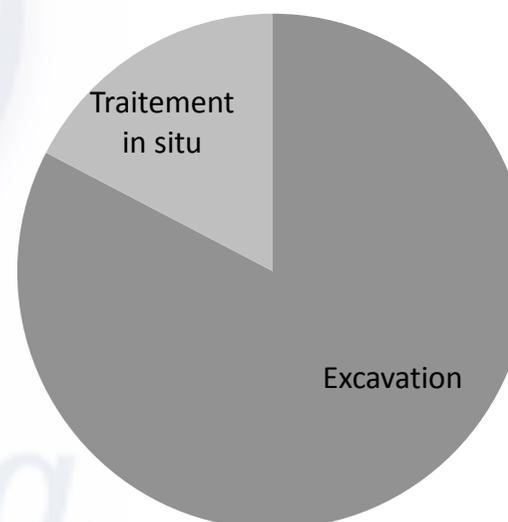
Typologie des 23 sites

Une grande diversité de situations de pollution

➔ Volumes à traiter



➔ Modalités de traitement



projet RECORD

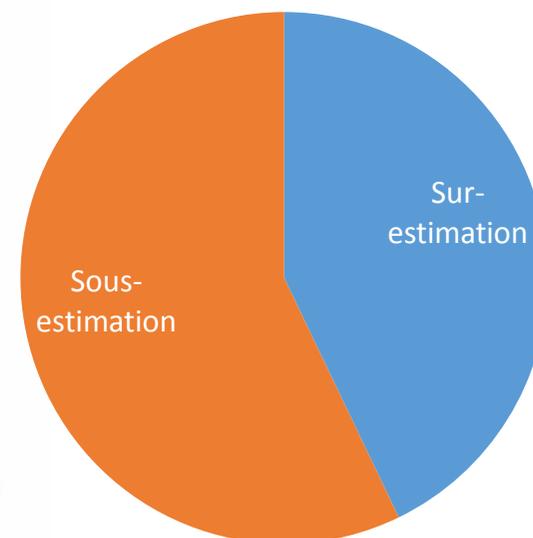


Quelles sont les « performances » de la géostatistique ?

Résultats de l'étude

Ecart entre estimation et quantité traitée

- ➔ 25% en moyenne
- ➔ 57% de sous-estimations
- ➔ > 30% dans un tiers des cas



projet RECORD



Quelles sont les « performances » de la géostatistique ?

Résultats de l'étude

Conditions d'investigation favorables

➔ Densité de sondages et échantillons

Au moins 1 sondage par 100 m²

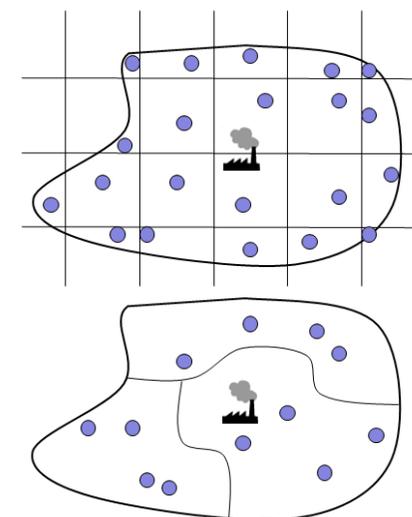
Au moins 1 échantillon par mètre dans les sondages

➔ Répartition et conditions d'échantillonnage

Répartition homogène des sondages dans la zone d'intérêt

Echantillonnage systématique le long des sondages

Protocole d'échantillonnage homogène



projet RECORD



Quelles sont les « performances » de la géostatistique ?

Résultats de l'étude

Choix de la méthode d'estimation

		Complexité de la situation de pollution	
		Moyenne	Forte
Conditions d'investigation	Favorables	Empirique	Empirique
		+Déterministe	+Déterministe
		+Géostatistique	+Géostatistique
	Défavorables	Empirique	Situation à éviter absolument Risque important d'écart très significatif entre diagnostic et dépollution, et ce quelle que soit la méthode d'estimation mise en œuvre.
		+Déterministe	
		+Géostatistique	

projet RECORD



Géostatistique pour les sites contaminés

-

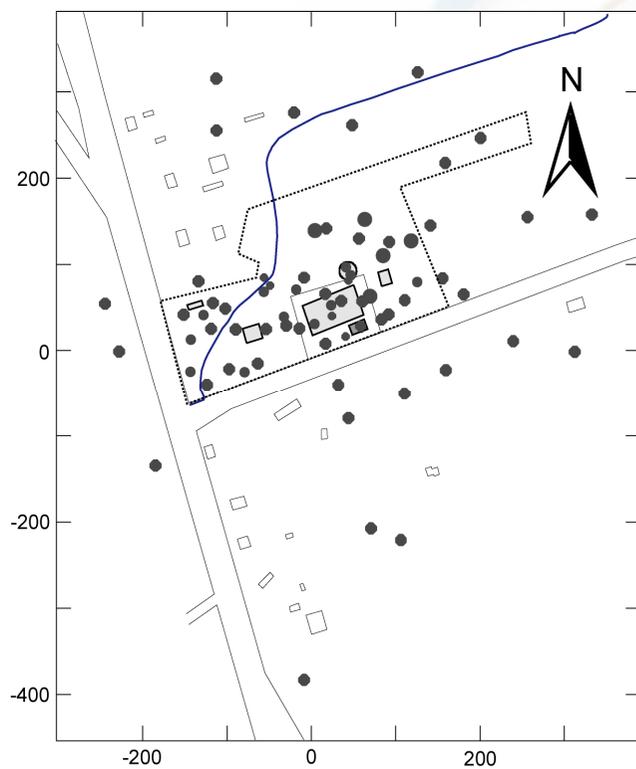
Impact sur la stratégie d'échantillonnage

Stratégies

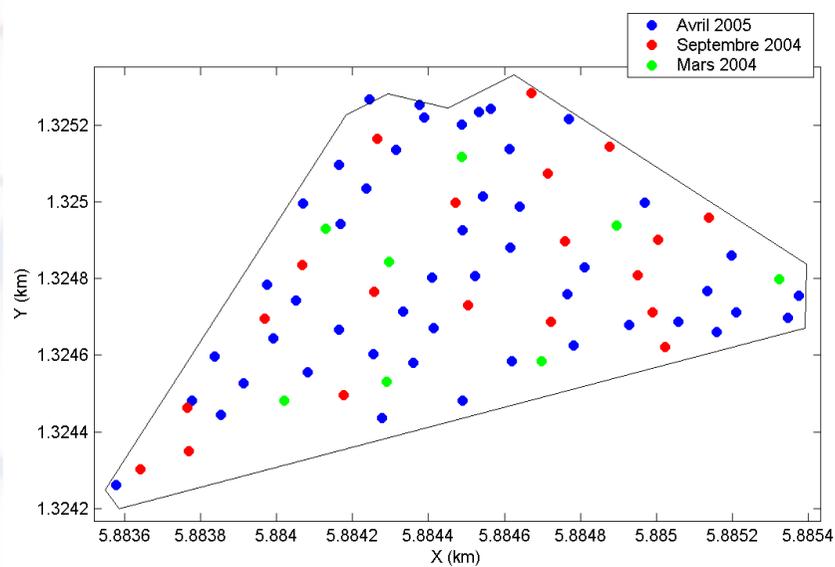
- Le choix d'une stratégie dépend :
 - des objectifs de la campagne
 - de la taille du site
 - des moyens disponibles
 - du type de source de pollution : ponctuelle vs diffuse
 - des données déjà disponibles
- Généralement en plusieurs phases

Stratégies

Basée sur l'historique du site

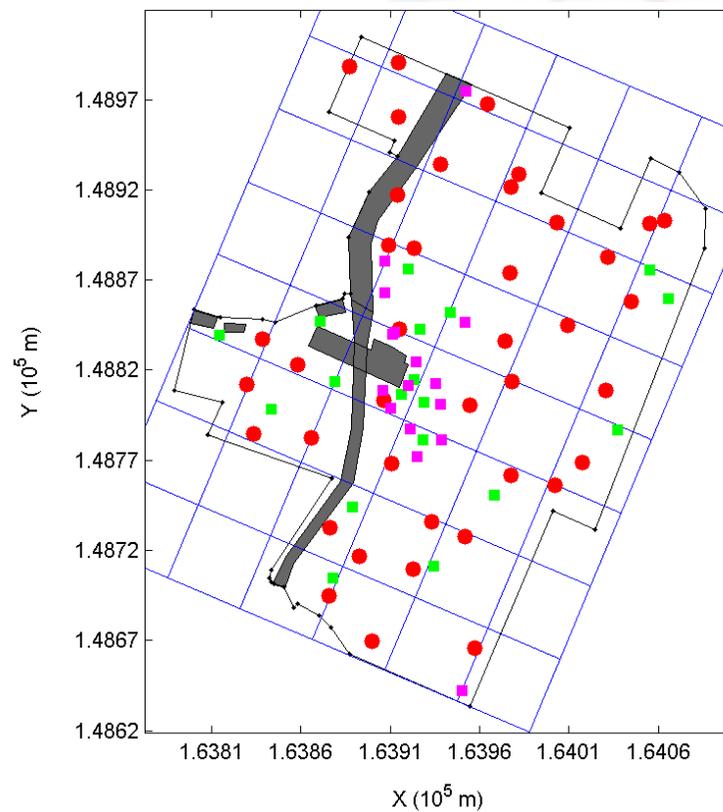


Systématique



Stratégies

Aléatoire stratifié



La géostatistique aide à :

- Optimiser le nombre de forages :
recherche du meilleur rapport
information/coût
- Optimiser la position des forages :
 - Couverture du site
 - Calcul du variogramme
 - Réduction de l'incertitude

Géostatistique pour les sites contaminés

- Outils

Source : **RECORD**, Retour d'expérience critique sur l'utilisation de méthodes géostatistiques pour la caractérisation des sites et sols pollués, 2013, 135 pages, n°11-0514/1A

Nom	Particularités	Type	Société Auteur Site web	Pays	Dim. Max.	Fonctionnalités	Complexité étude / objectifs	Niveau de connaissance requis	Appui logiciel	Dernière mise à jour
1.a Logiciels généralistes dédiés à la géostatistique										
GSO Geostat office		vendu avec livre	M.Kanevski & M.Maignan http://users.podolsk.ru/sc/her/eng/gsooffice/gswat.htm Livre : analysis and modeling of spatial environmental data, M.Kanevski & M.Maignan, EPFL press	CH	2D	Analyse statistique exploratoire, analyse variographique, cokrigage, simulations, etc...	++	++	-	2004
Isatis		commercial 	Geovariances www.geovariances.com	F	3D	Analyse statistique exploratoire, analyse variographique, cokrigage, cosimulations, etc...	+++	++	support par tél ou email, formations	2012
SGeMS		gratuit 	Stanford University http://sgems.sourceforge.net/	USA	3D	Analyse statistique exploratoire, analyse variographique, cokrigage, cosimulations, etc...	+++	++	formations délivrées par Alexandre Boucher, un des développeurs du logiciel (ar2tech.com/), forum utilisateurs	2012
1.b Logiciels ou modules de géostatistique dédiés aux « sites pollués »										
Karlotrak	workflow dédié aux sites contaminés	commercial 	Geovariances www.geovariances.com	F	3D	Analyse statistique exploratoire, analyse variographique, krigage, simulation	+	+	support par tél. ou email, formations traditionnelles	2012
SADA	Logiciel dédié aux sites contaminés	gratuit	University of Tennessee http://www.tiem.utk.edu/~sada/	USA	3D	Analyse statistique exploratoire, analyse variographique, krigages, simulations + analyse de risque sanitaire et/ou écotoxicologique + analyse coût-bénéfice	+	+	support par email, forum utilisateurs	2012

Nom	Particularités	Type	Société Auteur Site web	Pays	Dim. Max.	Fonctionnalités	Complexité étude / objectifs	Niveau de connaissance requis	Appui logiciel	Dernière mise à jour
Soil Remediation	module (plug-in) et workflow dans GOCAD	commercial	Kidova www.kidova.com	F	3D	Analyse statistique exploratoire, analyse variographique, cokrigage, cosimulations,...	++	+	(1)	(1)
2. Outils géostatistiques intégrés dans un SIG										
ArcGIS Geostatistical analyst	extension proposée dans ArcGIS, workflow	commercial 	ESRI http://www.esri.com/software/arcgis/extensions/geostatistical	USA	2D	Analyse statistique exploratoire, analyse variographique, cokrigage, cosimulations, etc...	+	+	support par tél ou email, formations traditionnelles ou en ligne, forum utilisateurs	2012
3. Outils géostatistiques intégrés dans un logiciel de visualisation 3D										
Surfer		commercial 	Golden software http://www.goldensoftware.com/	USA	2D	Variographie, krigage Visualisation 3D de surface	+	+	support par tél ou email, formation par vidéos, forum utilisateurs,	2012
EVS		commercial	C Tech http://www.clech.com/	USA	3D	Variographie, krigage Visualisation 3D de surface	+	+	support par email, formations traditionnelles, forum utilisateurs	2012
4. Outils géostatistiques intégrés dans un logiciel de modélisation 3D										
3D Geomodeler	extension (plug-in) Isatis	commercial	BRGM, Intrepid geophysics http://www.geomodeler.com/	F, A	3D	Analyse statistique exploratoire, analyse variographique, cokrigage, cosimulations, etc...	+++	+++	support par tél ou email, formations, forum utilisateurs	2012
GOCAD		commercial	ENSG, http://www.gocad.org/w4/ et http://www.pdgm.com/	F	3D	Analyse statistique exploratoire, analyse variographique, cokrigage, cosimulations, etc...	+++	+++	support par tél ou email, formations, forum utilisateurs	2012
5. Langages de programmation et environnements de développement										
Matlab		commercial	Mathworks www.mathworks.com	USA	3D	Possibilités de développement infinies. De nombreux auteurs mettent de plus à disposition des « boîtes à outils géostatistiques » Matlab : mGstat, Matlab kriging toolbox, etc.	+++	+++	support par tél ou email, formations traditionnelles ou en ligne, forum utilisateurs	2012
R	outils développés et vérifiés par la communauté de statisticiens avant mise en ligne	gratuit	statisticiens du monde entier http://www.r-project.org/	Nile Zél.	3D	Possibilités de développement infinies. De nombreux auteurs mettent de plus à disposition des « boîtes à outils géostatistiques » R : Gstat, geoR, etc.	+++	+++	support par tél ou email, formations traditionnelles ou en ligne, forum utilisateurs	2012

(1) En cours de développement, commercialisation prévue en 2012.

Géostatistiques pour les sites contaminés

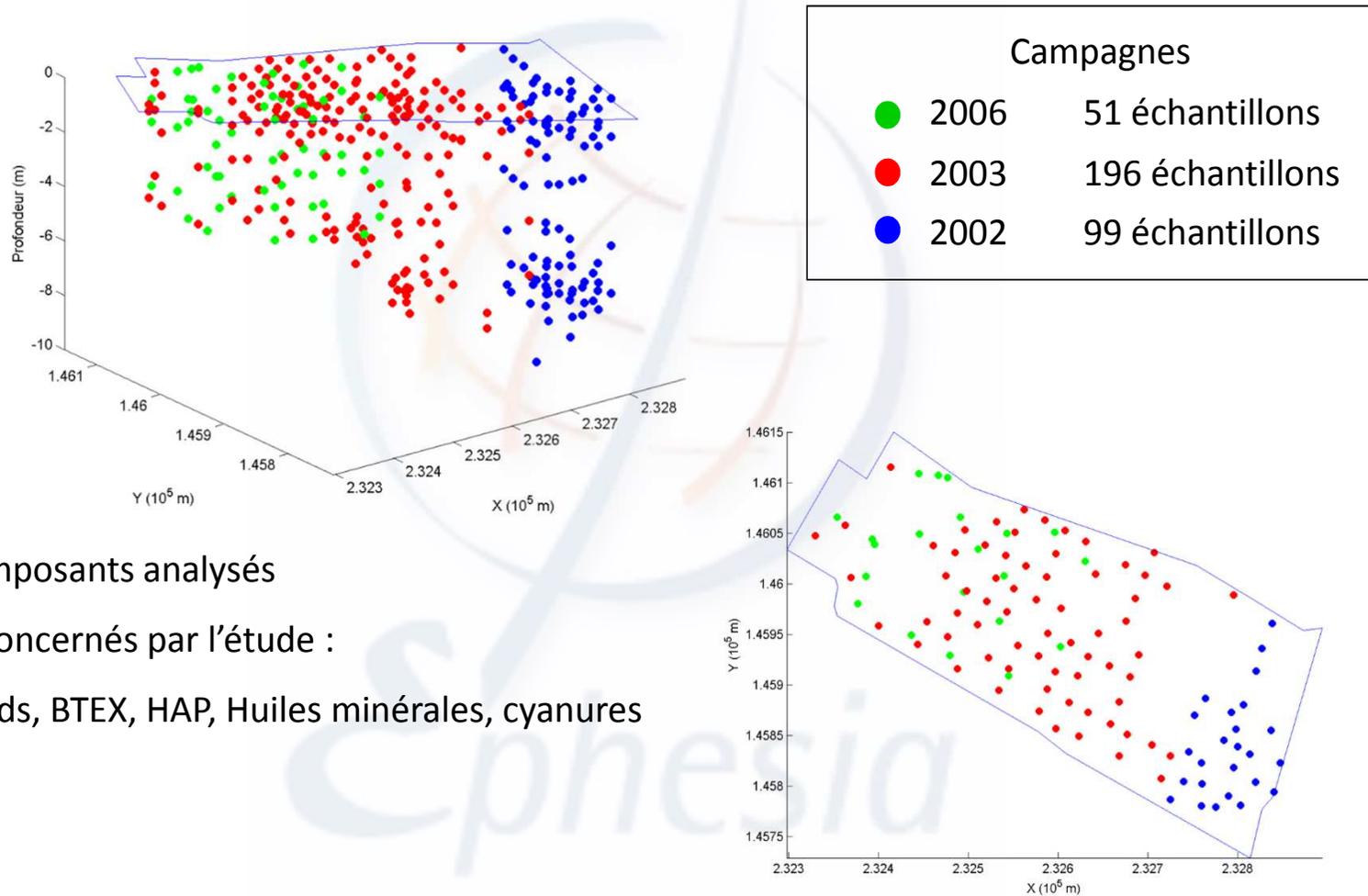
-

Un cas d'application



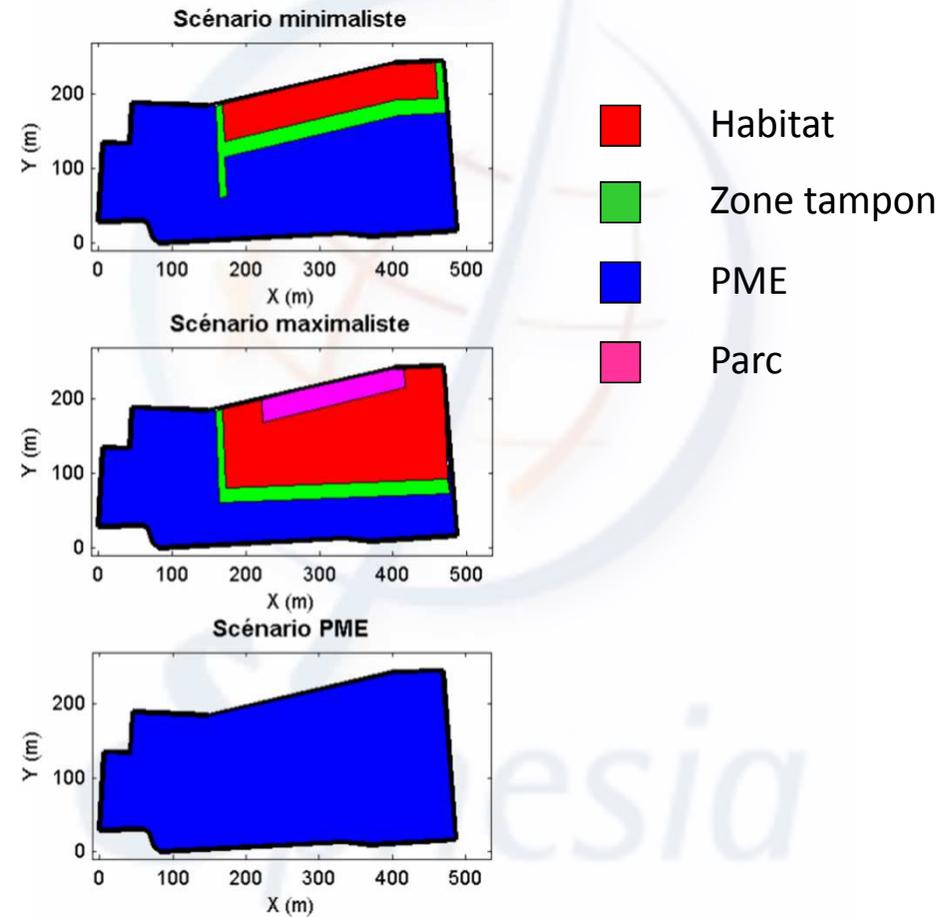
- Ancienne cokerie
- Usine d'engrais et de produits chimiques
- Histoire complexe
- Superficie : 11.5 ha





- Plus de 50 composants analysés
- 25 polluants concernés par l'étude :
Métaux lourds, BTEX, HAP, Huiles minérales, cyanures
- Problème 3D

Comparaison de différents scénarios de réhabilitation



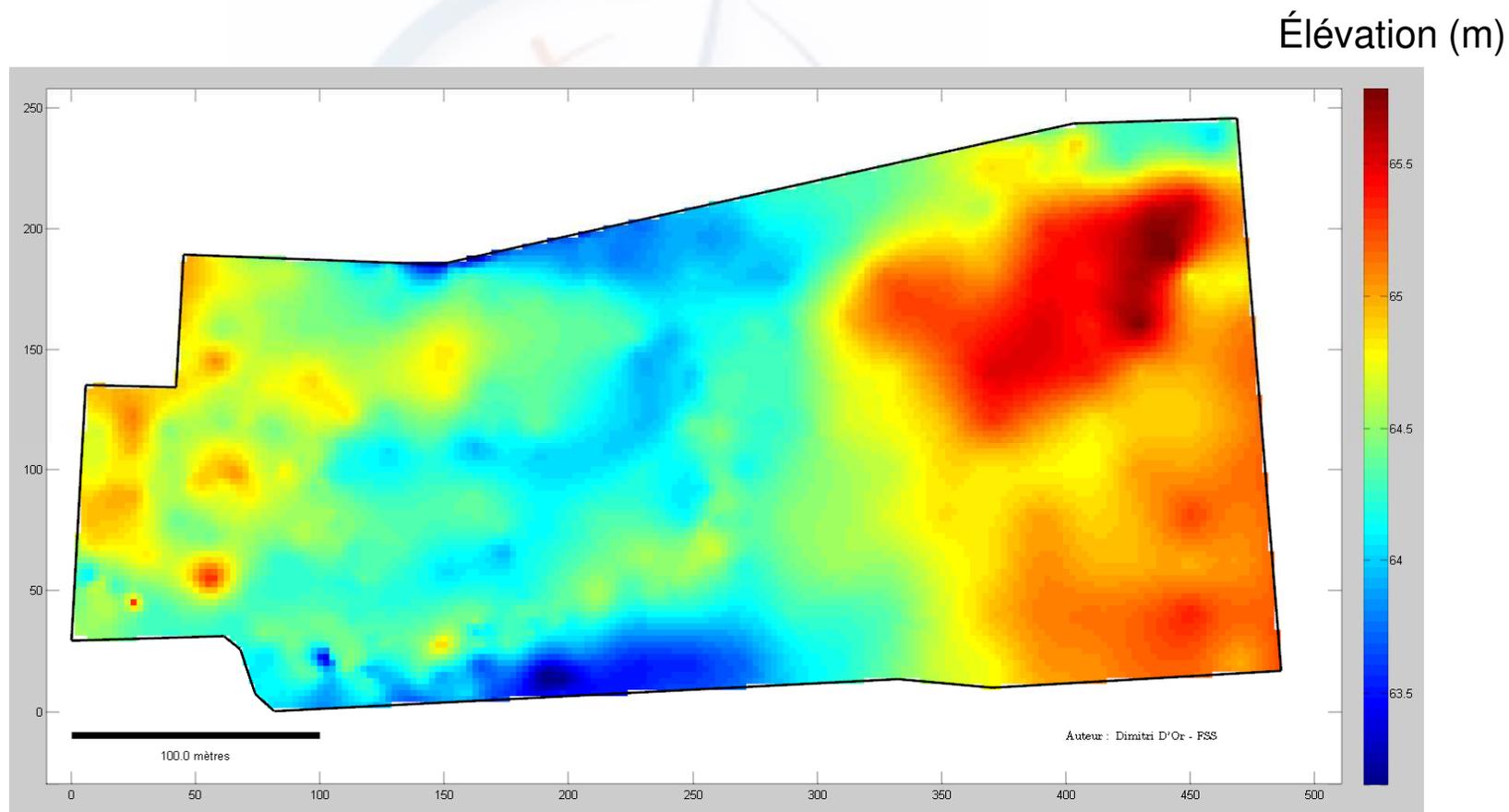
	Usage résidentiel avec jardin potager			Usage récréatif ou commercial			Usage industriel		
	min(VS _{H-surface} , VS _N , VS _C)	min(VS _{H-surface} , VS _N)	min(VS _{H-profondeur} , VS _N)	min(VS _{H-surface} , VS _N , VS _C)	min(VS _{H-surface} , VS _N)	min(VS _{H-profondeur} , VS _N)	min(VS _{H-surface} , VS _N , VS _C)	min(VS _{H-surface} , VS _N)	min(VS _{H-profondeur} , VS _N)
Profondeur pour respect du critère	0-0.5 m	0.5-1.0 m	> 1 m	0-0.5 m	0.5-1.0 m	> 1 m	0-0.5 m	0.5-1.0 m	> 1 m
	(mg/kg _{max})			(mg/kg _{max})			(mg/kg _{max})		
Métaux lourds et métalloïdes									
Arsenic	41	57	NL	41	166	NL	316	316	NL
Cadmium	3.1	3	NL	9.8	87	NL	209	209	NL
Chrome total	125	290	NL	125	571	NL	4892	4892	NL
Cuivre	110	823	NL	110	13134	NL	38329	38329	NL
Mercuré	9	9	NL	13	68	NL	582	582	NL
Nickel	153	275	NL	153	1020	NL	1245	1245	NL
Piomb	195	195	NL	279	406	NL	3115	3115	NL
Zinc	232	3464	3464	232	3464	3464	2953	2953	2953
Hydrocarbures aromatiques monocycliques non halogénés									
Benzène⁴	0.2	0.2	0.2	1.8	1.8	1.8	0.7	0.7	0.7
Ethylbenzène	8.8	8.8	23.2	11.6	155.8	158.1	111.3	111.3	111.4
Toluène	3.3	3.3	3.9	8.5	84.3	84.6	22.0	22.0	22.0
Xylènes	2.0	11.6	27.4	2.0	251.5	255.0	141.6	141.6	139.9
Hydrocarbures aromatiques polycycliques non halogénés									
Benzo(a)anthracène	1.0	1.2	NL	1.0	24.7	NL	173.4	173.4	NL
Benzo(b)fluoranthène	0.3	0.3	NL	0.9	24.8	NL	174.1	174.1	NL
Benzo(k)fluoranthène	1.3	1.3	NL	3.9	24.9	NL	174.3	174.3	NL
Benzo(ghi)perylène	3.1	2053.9	NL	3.1	3247.9	NL	22736.4	22736.4	NL
Benzo(a)pyrène	0.5	0.5	NL	0.9	2.6	NL	17.2	17.2	NL
Chrysène	4.9	6.8	NL	4.9	248.9	NL	1743.0	1743.0	NL
Fluoranthène	25.1	33.2	NL	25.1	1334.6	NL	9443.9	9443.9	NL
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	0.2	0.2	NL	1.2	24.9	NL	174.3	174.3	NL
Naphtalène	1.7	6.0	128.3	1.7	1216.0	NL	13127.6	13127.6	NL
Phénanthrène	6.5	38.3	NL	6.5	4256.3	NL	30199.0	30199.0	NL
Paramètres Intégrateurs									
Huiles minérales (C10-C40)	750	750	750	750	750	750	1000	1000	1000
Cyanures									
Cyanures libres⁵	4	4	4	48	48	48	88	88	88
Cyanures totaux⁶	9.6	9.6	9.6	240	240	240	440	440	440

- Estimer et cartographier les volumes pour 8 classes de sols pollués :
 - Métaux (sauf arsenic)
 - Arsenic
 - Métaux et arsenic
 - Cyanures
 - Composants organiques (HAP, benzène et huiles minérales)
 - Organiques et métaux
 - Pollutions complexes : organiques + métaux + cyanures
 - Non pollué
- Calculer les incertitudes associées (risques d'erreur de classification)
- Classer les sols en filières de traitement :
 - **Traitement** si les sols sont très certainement pollués
 - **Valorisation** si les sols sont très certainement non pollués
 - **Tri sélectif** si les sols ne peuvent être classés avec une confiance suffisante

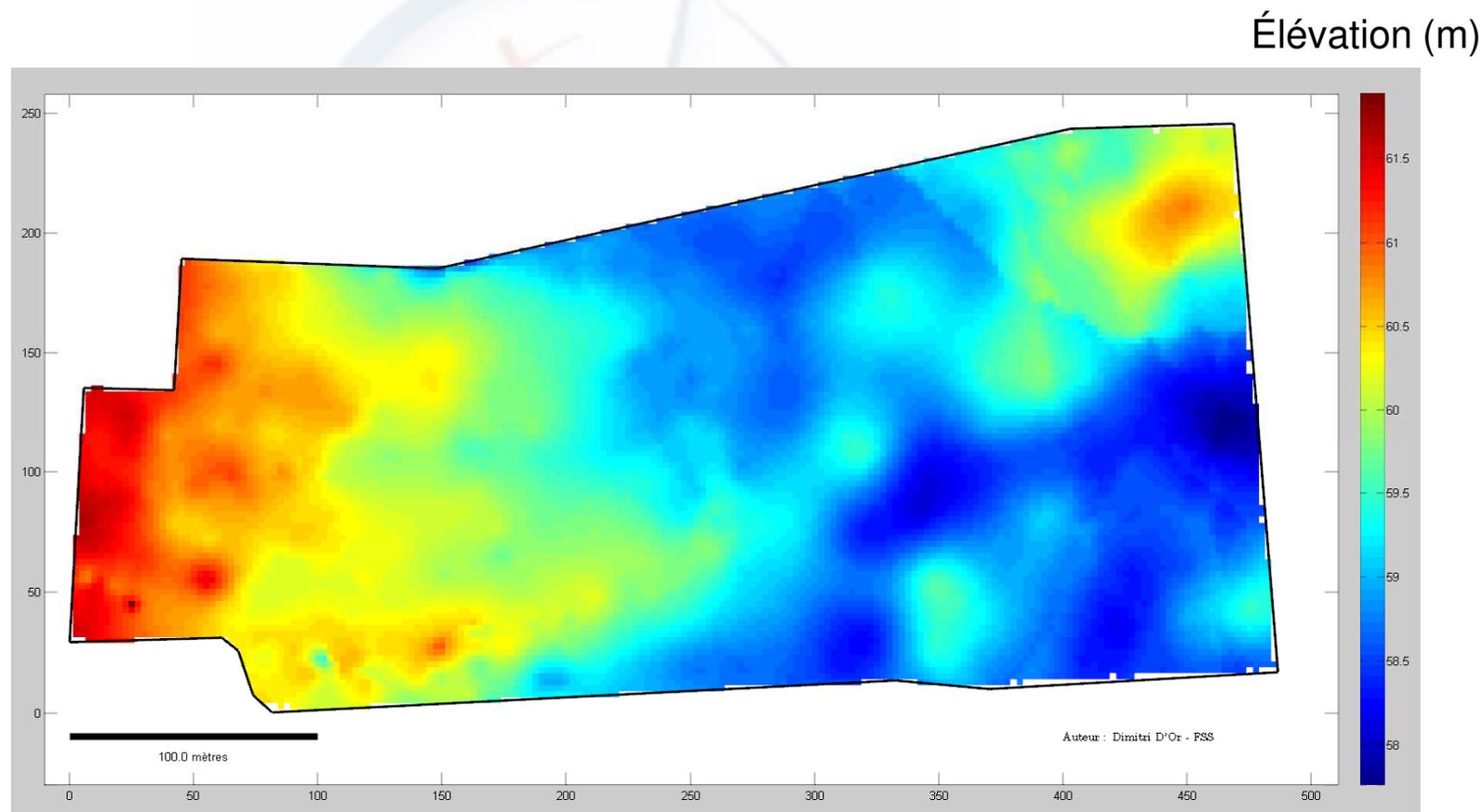
5 étapes :

1. Délimitation du domaine
2. Définition des grilles de simulation et de travaux
3. Variographie
4. Simulations
5. Post-traitement :
 - *Classification des sols*
 - *Estimation des volumes*
 - *Cartographies*
 - *Gestion des incertitudes*

Modélisation de la surface du domaine



Modélisation de la base du domaine



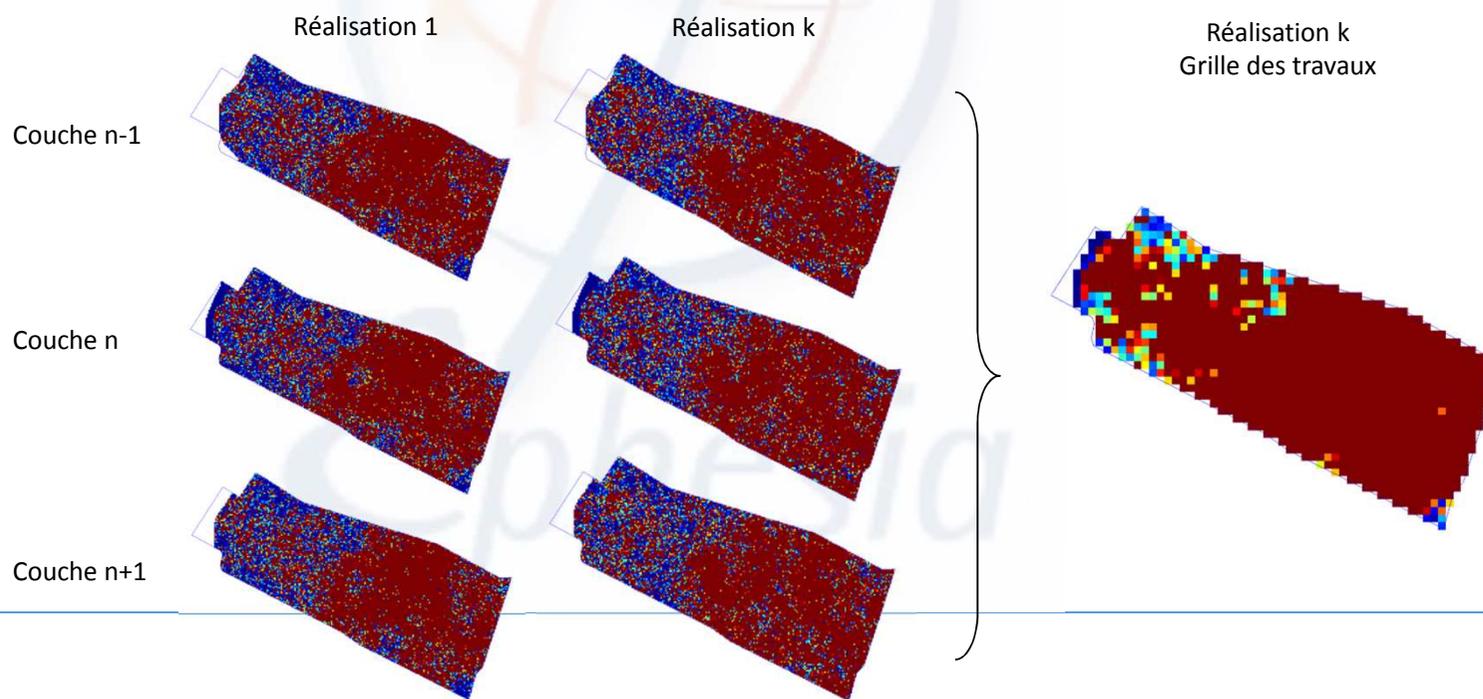
- Grille de simulation : 1 454 076 mailles de 2,5 x 2,5 x 0,2 m (vol = 1.25 m³)
dont 500 608 sont dans le domaine
- Grille de travaux : 33 540 mailles de 10 x 10 x H m
dont 11 320 sont dans le domaine

avec :

Couche	H (cm)	Volume (m ³)
0 – 0,5 m	50	50
0,5 – 1,0 m	50	50
> 1,0 m	100	100

- Le volume des mailles tronquées par la base des remblais est adapté
- Le volume total à modéliser est de 613 000 m³, soit 950 000 t de sol

- Composant par composant pour les composants indépendants
- Cosimulation pour les groupes
- 100 réalisations
- Sur la grille fine
- Passage sur la grille des travaux par calcul de la moyenne



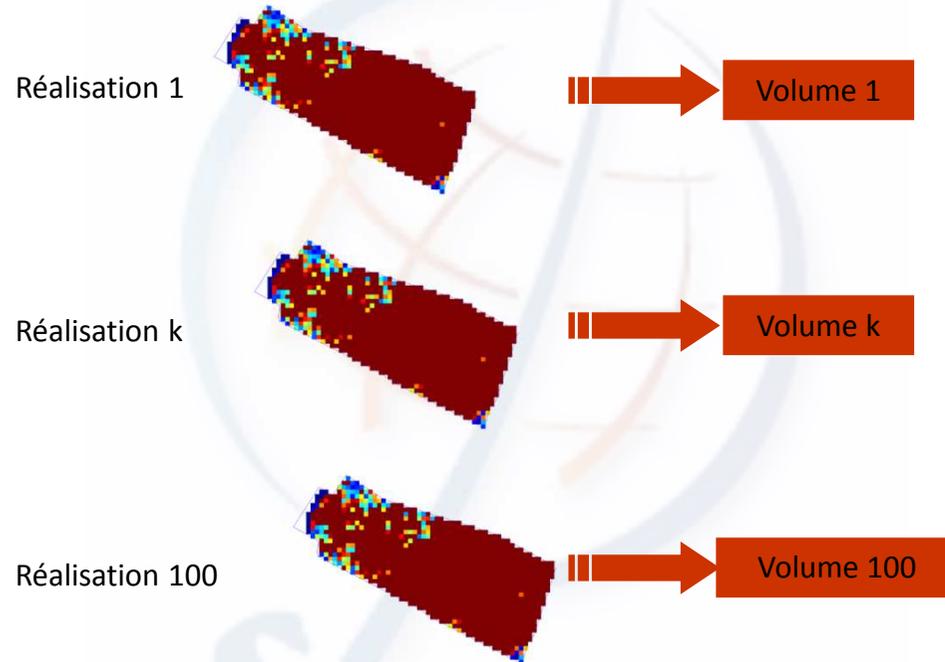
- Classification des sols en 8 classes
 - Métaux (sauf arsenic)
 - Arsenic
 - Métaux et arsenic
 - Cyanures
 - Composants organiques (HAP, benzène et huiles minérales)
 - Organiques et métaux
 - Pollutions complexes : organiques + métaux + cyanures
 - Non pollué
- Pollué si au moins un composant du groupe dépasse son seuil plus de la moitié des réalisations

$$P \geq 0.5$$

- Calcul des probabilités d'erreur de classification :

$$E = 1 - P \quad \text{avec} \quad 0 \leq E \leq 0.5$$

- Estimation des volumes :



- Cartographies

- *Classes de sol*
- *Probabilités d'erreur de classification*

- Gestion des incertitudes
 - *Prise en compte des erreurs de classification*
 - *Décision par rapport à des niveaux de confiance*

Notion de probabilité d'erreur sur la classification

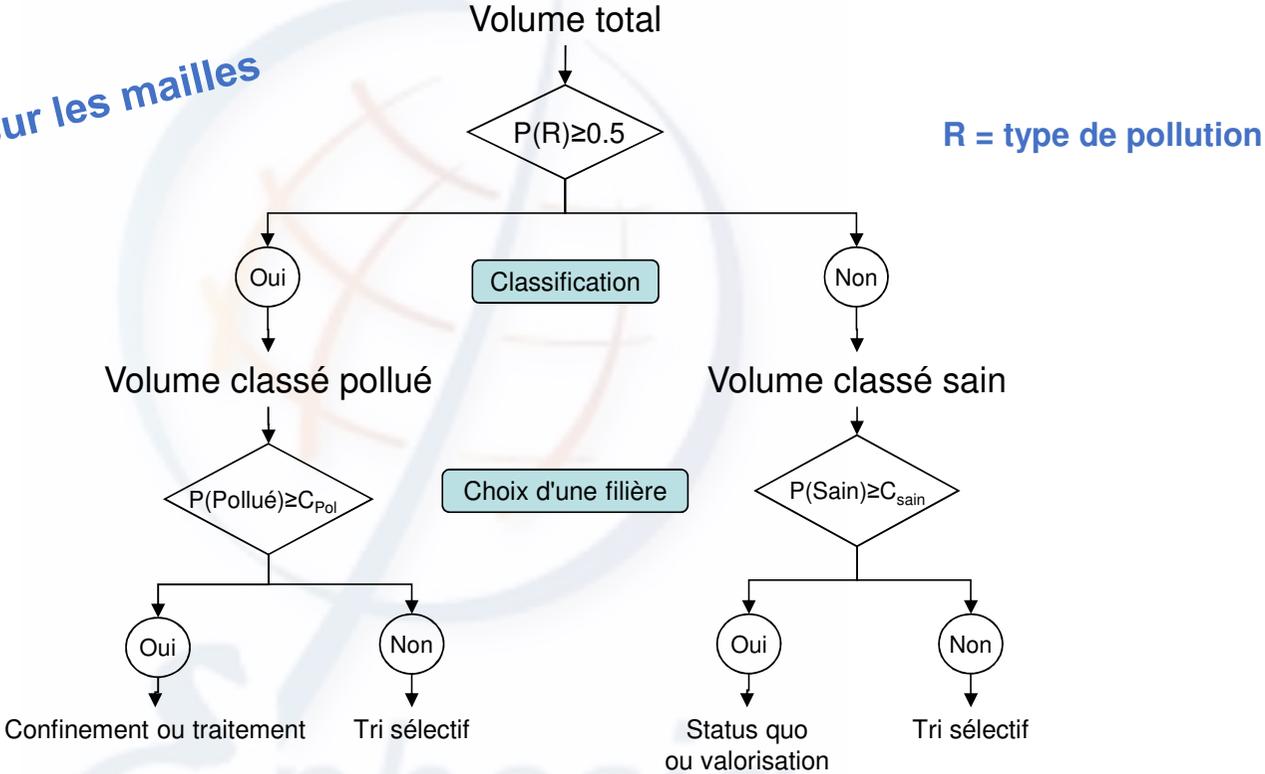
$\alpha = \text{Prob}\{\text{maille saine classée comme contaminée}\}$

$\beta = \text{Prob}\{\text{maille contaminée classée comme saine}\}$

Critères de décision

- Stockage ou confinement
 - **Si** $\alpha < (\text{coût tri sélectif} / \text{surcoût de stockage})$
Pour ce cas d'étude : **$\alpha \leq 0,1$**
- Valorisation ou status quo
 - **Si** $\beta < (\text{proportion de sols contaminés laissés en place})$
Pour ce cas d'étude : **$\beta \leq 0,075$**
- **Sinon** : tri sélectif préconisé

boucle sur les mailles

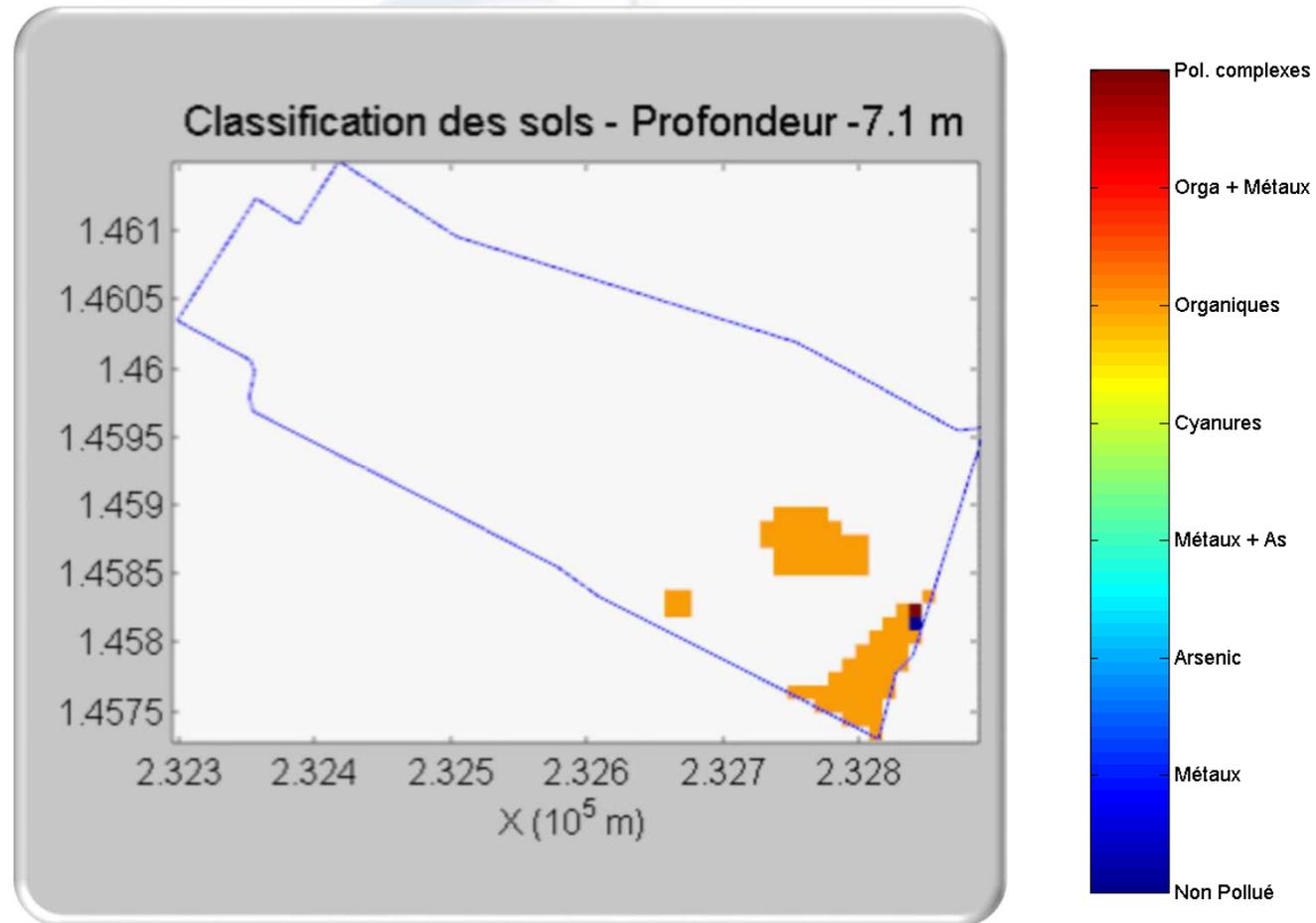


R = type de pollution

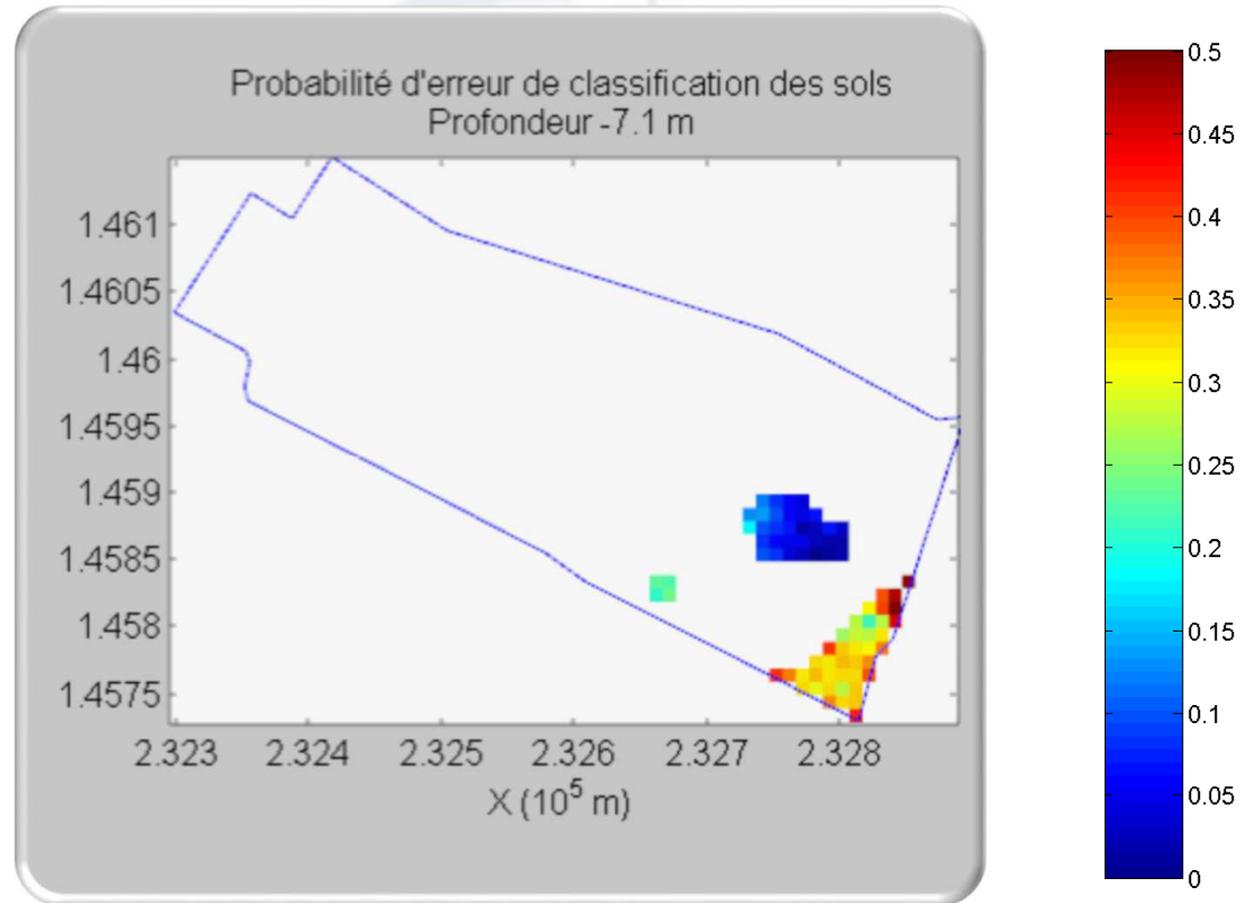
➡ Cartes de filières, volumes de sols affectés à chaque filière



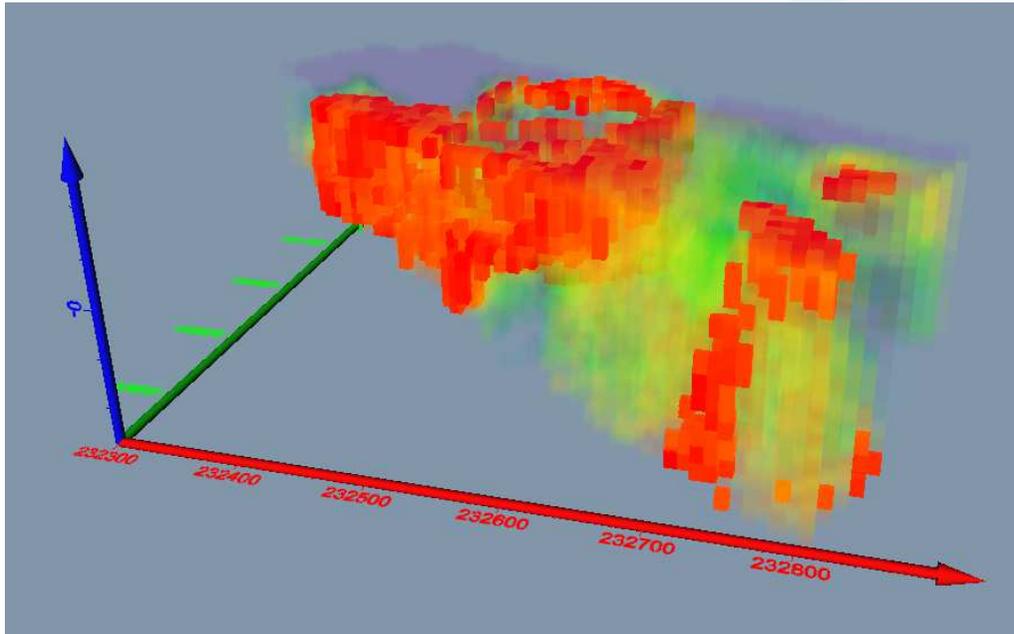
- Classification des sols en 8 classes par rapport aux objectifs d'assainissement



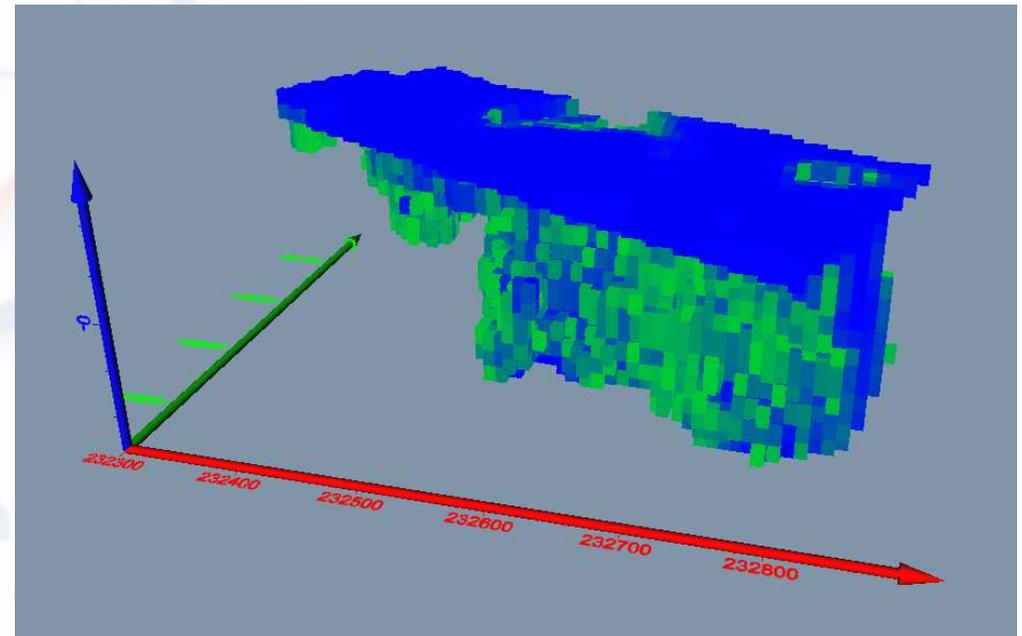
- Incertitudes sur la classification par rapport aux objectifs d'assainissement



Zones où le risque d'erreur est supérieur à 40%



Zones où le risque d'erreur est inférieur à 10%



- Volumes et tonnages estimés par rapport aux objectifs d'assainissement (OA)

Volumes

Statistique	Non pollué	Pollué	Métaux	Arsenic	Métaux + As	Cyanures	Organiques	Organiques + Métaux	Pollutions complexes
Q0.025	139128	399947	7276	3008	24878	9839	262266	26506	15485
MU	172321	440733	12628	5506	38193	19968	306139	34730	23569
Q0.975	213107	473927	20726	8470	51599	37640	341405	48640	36153

Tonnages

Statistique	Non pollué	Pollué	Métaux	Arsenic	Métaux + As	Cyanures	Organiques	Organiques + Métaux	Pollutions complexes
Q0.025	215648	619917	11279	4663	38560	15250	406512	41085	24002
MU	267098	683136	19573	8535	59198	30950	474516	53832	36531
Q0.975	330316	734586	32125	13128	79978	58342	529178	75392	56037



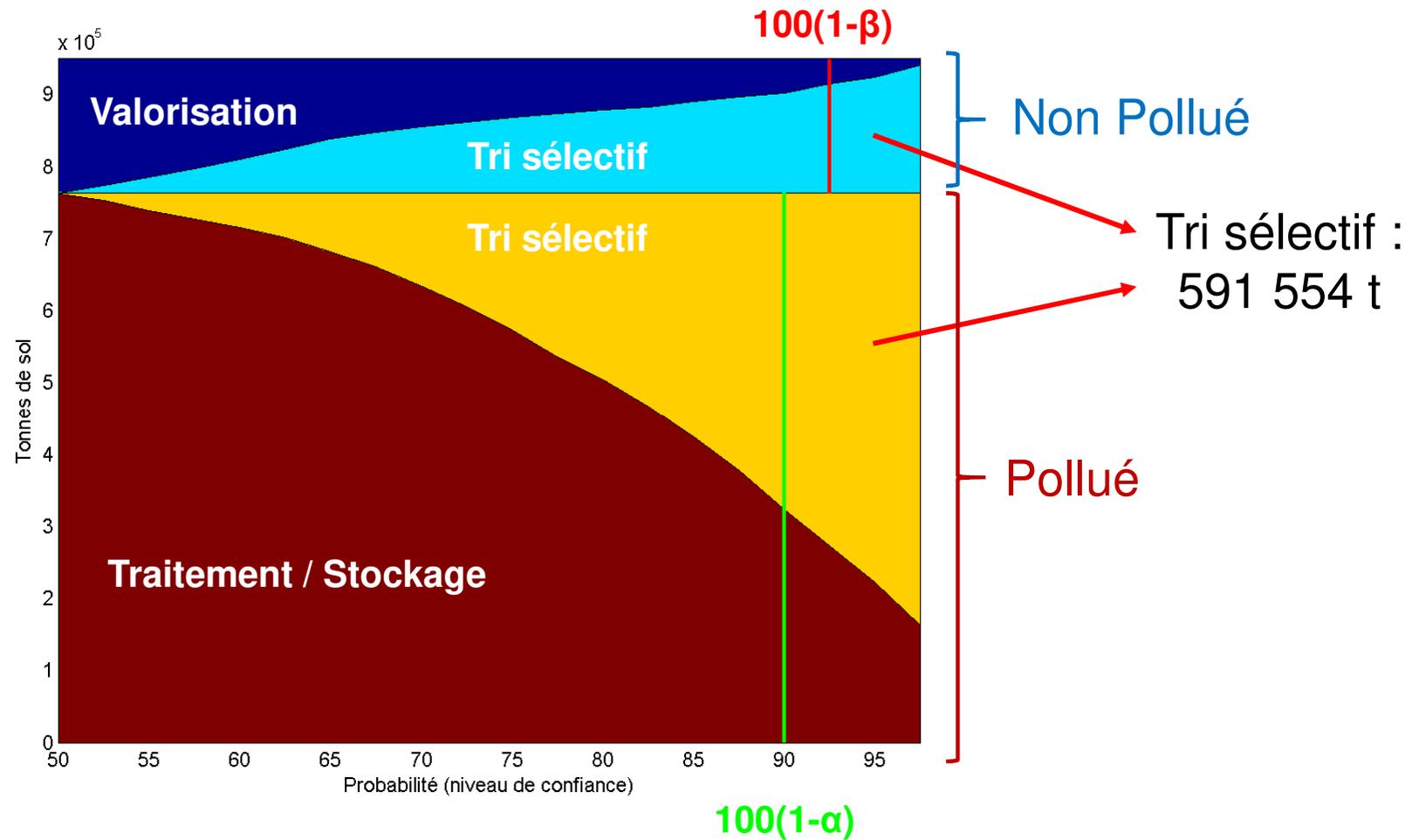
683 136 t de sols seraient pollués

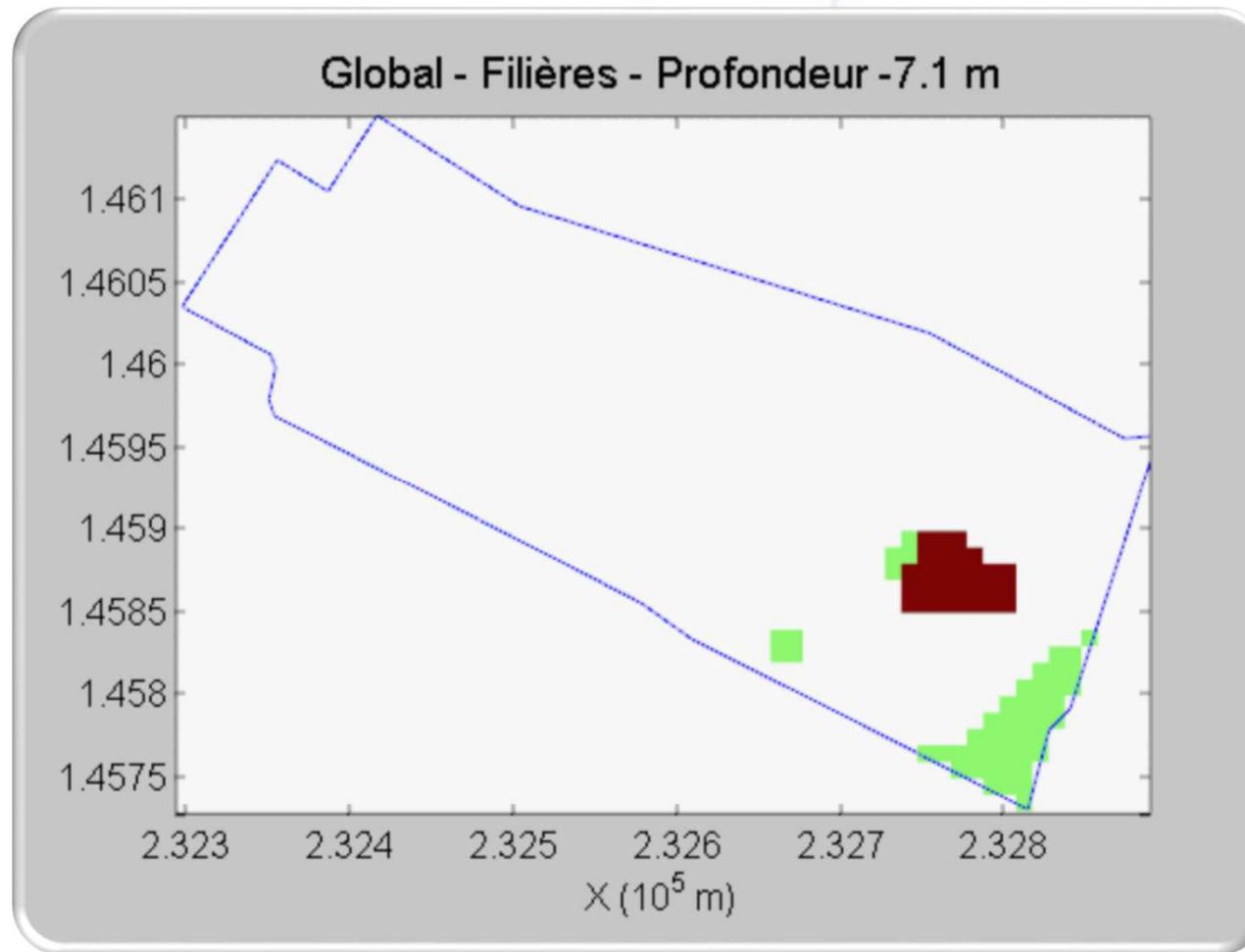


474 516 t de sols sont pollués aux organiques seuls et pourraient donc être remblayés en profondeur après traitement thermique

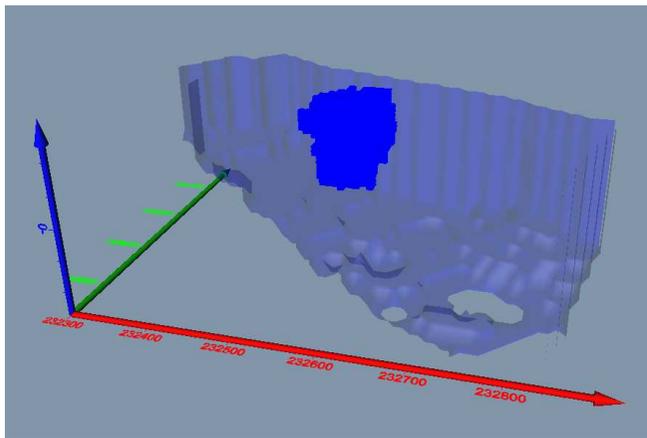


53 832 + 36 531 t resteront polluées aux métaux après traitement thermique

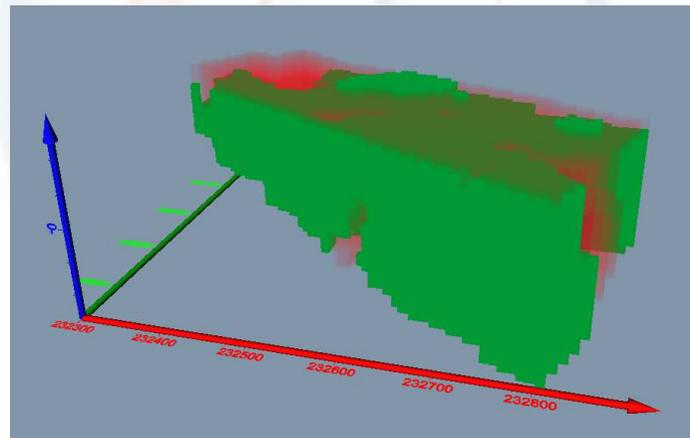




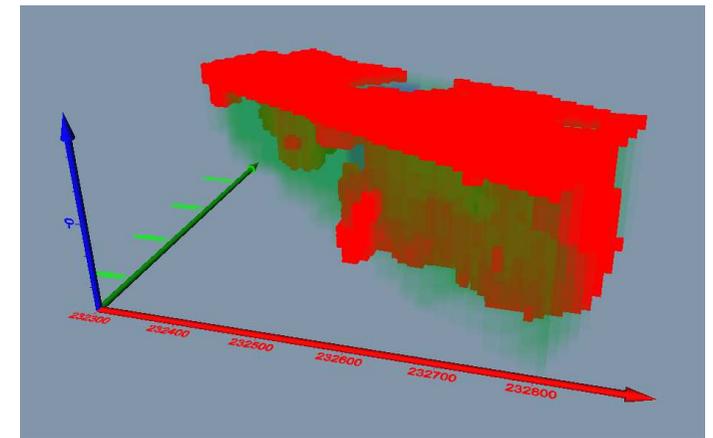
Zone très probablement non polluée

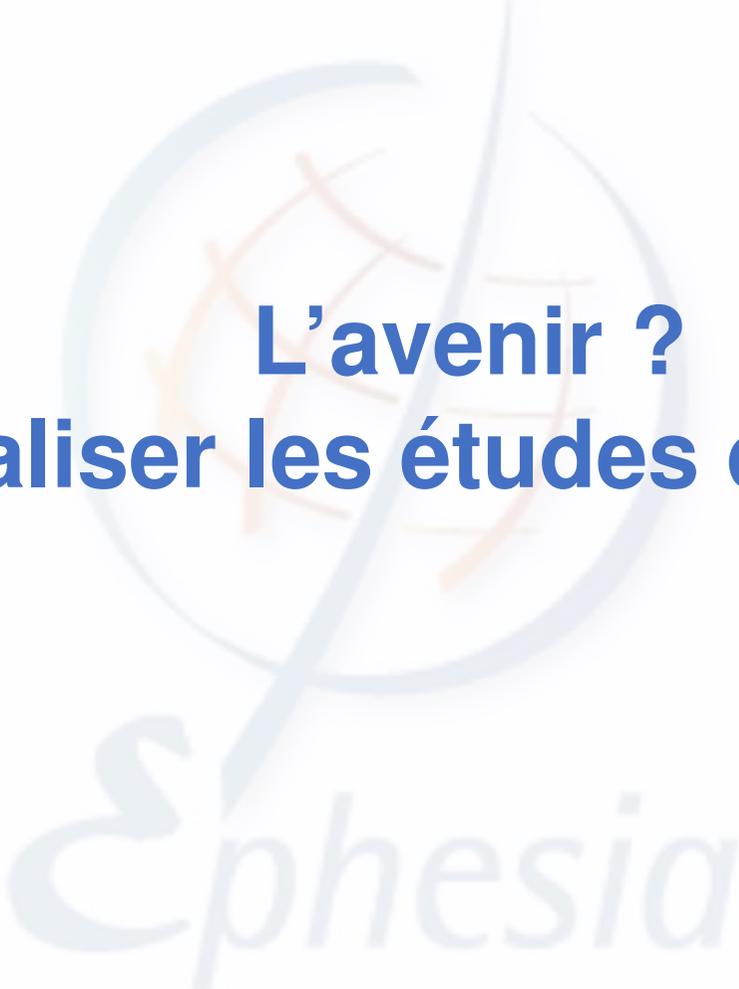


Zone incertaine



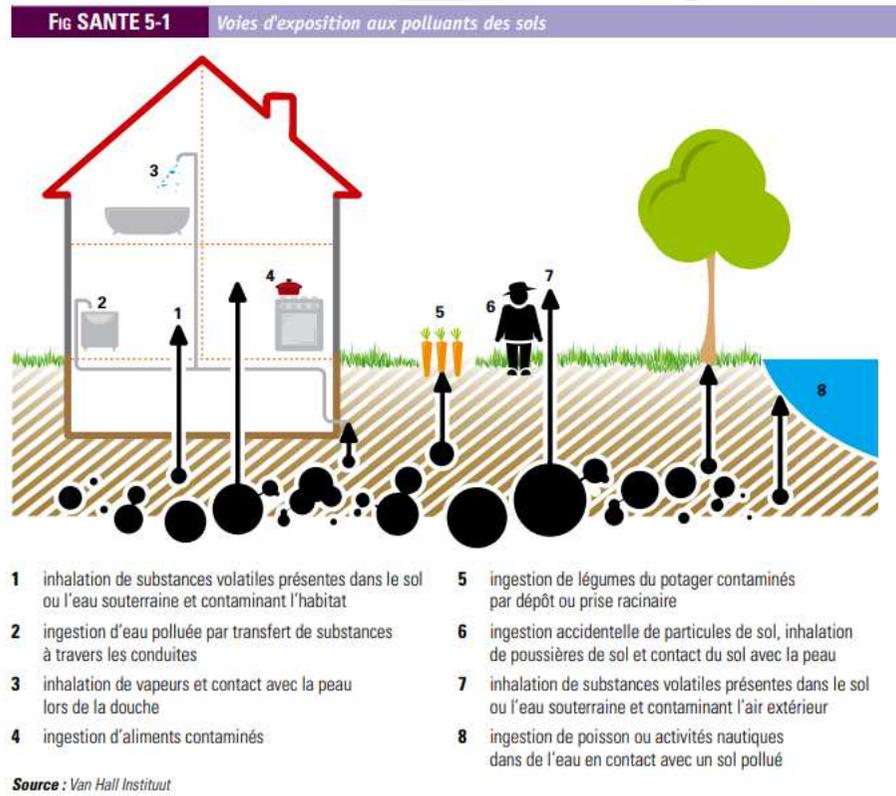
Zone très probablement polluée





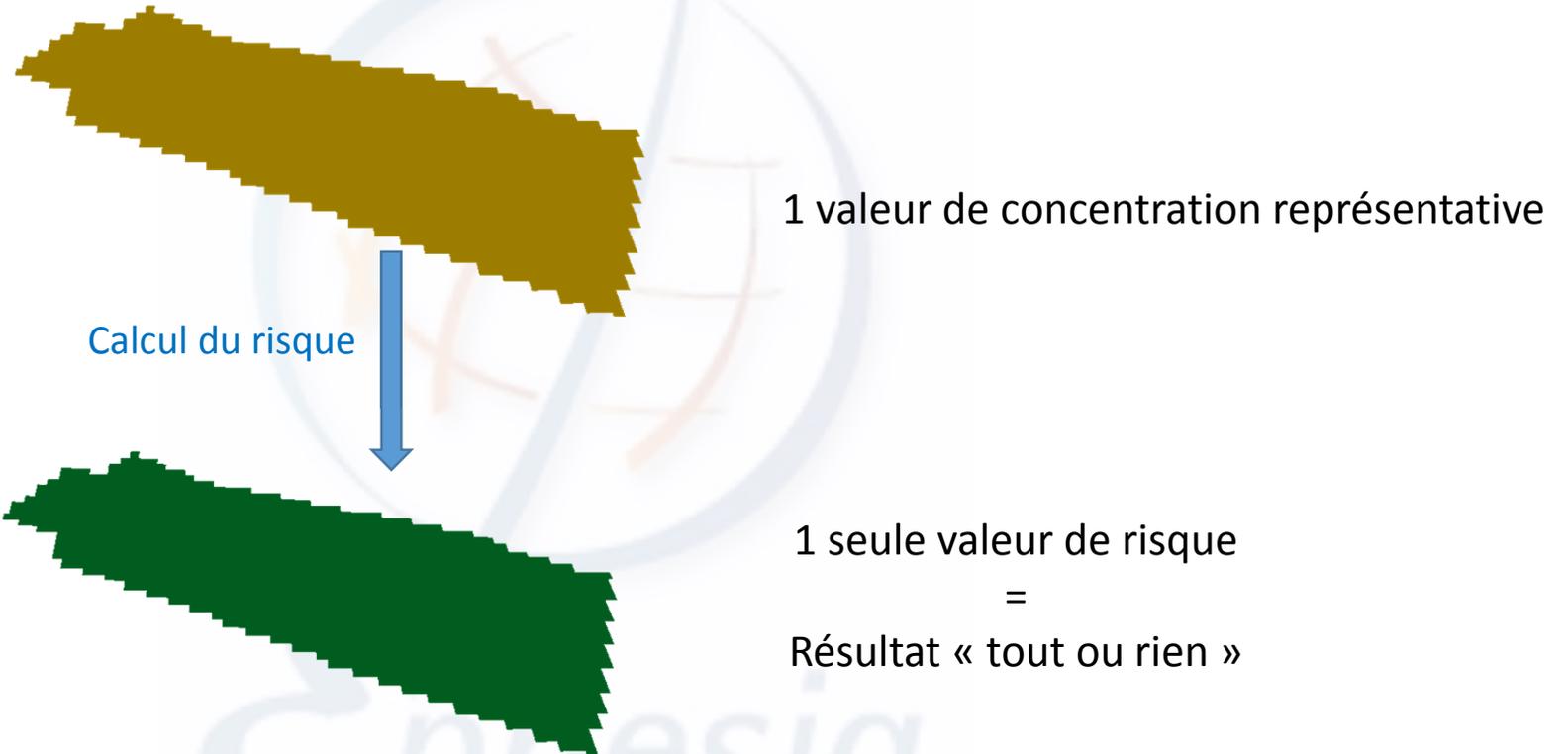
L'avenir ?
Spatialiser les études de risques

Situation actuelle



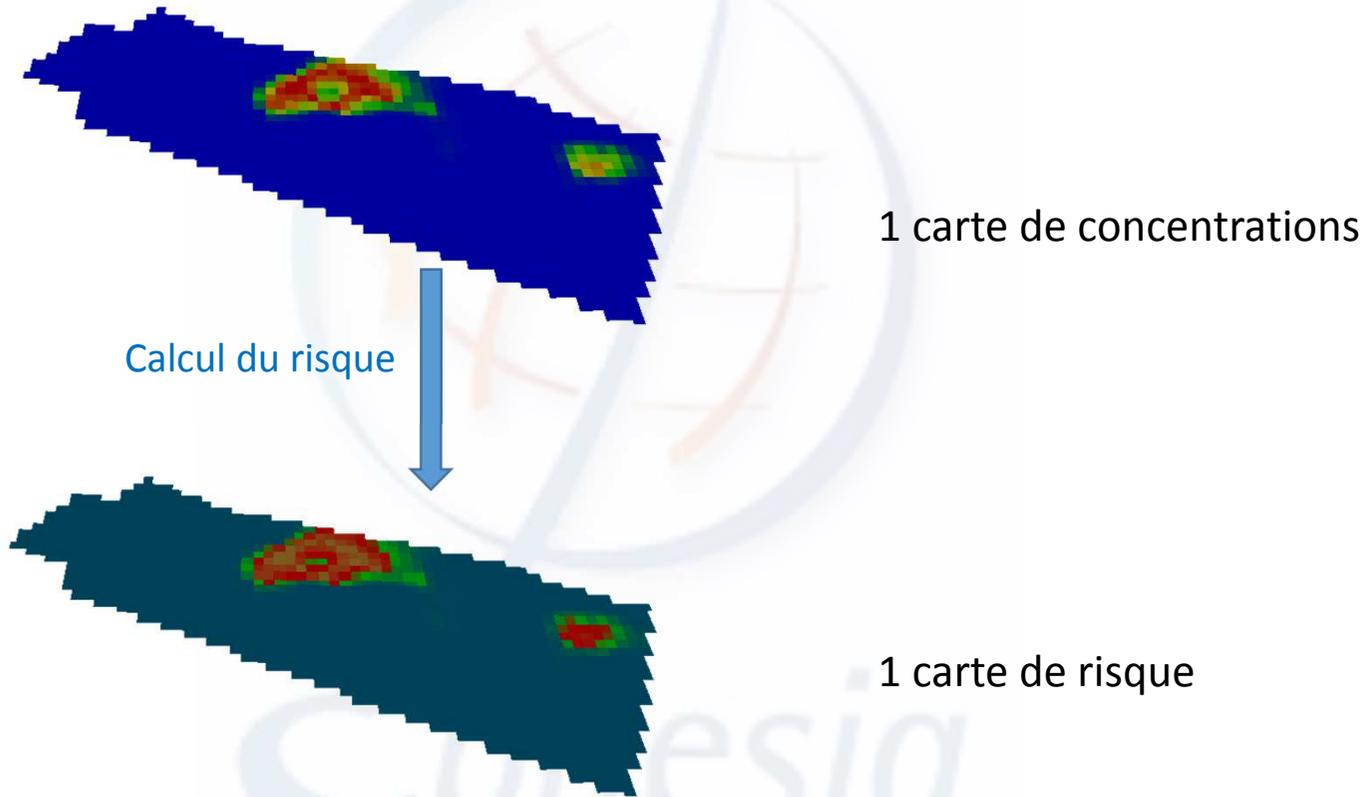
MAES, E. 2006. *Liens environnement-santé*. Dossier scientifique réalisé dans le cadre de l'élaboration du Rapport analytique 2006-2007 sur l'état de l'environnement wallon. CEEW. Namur. 110p.

Situation actuelle

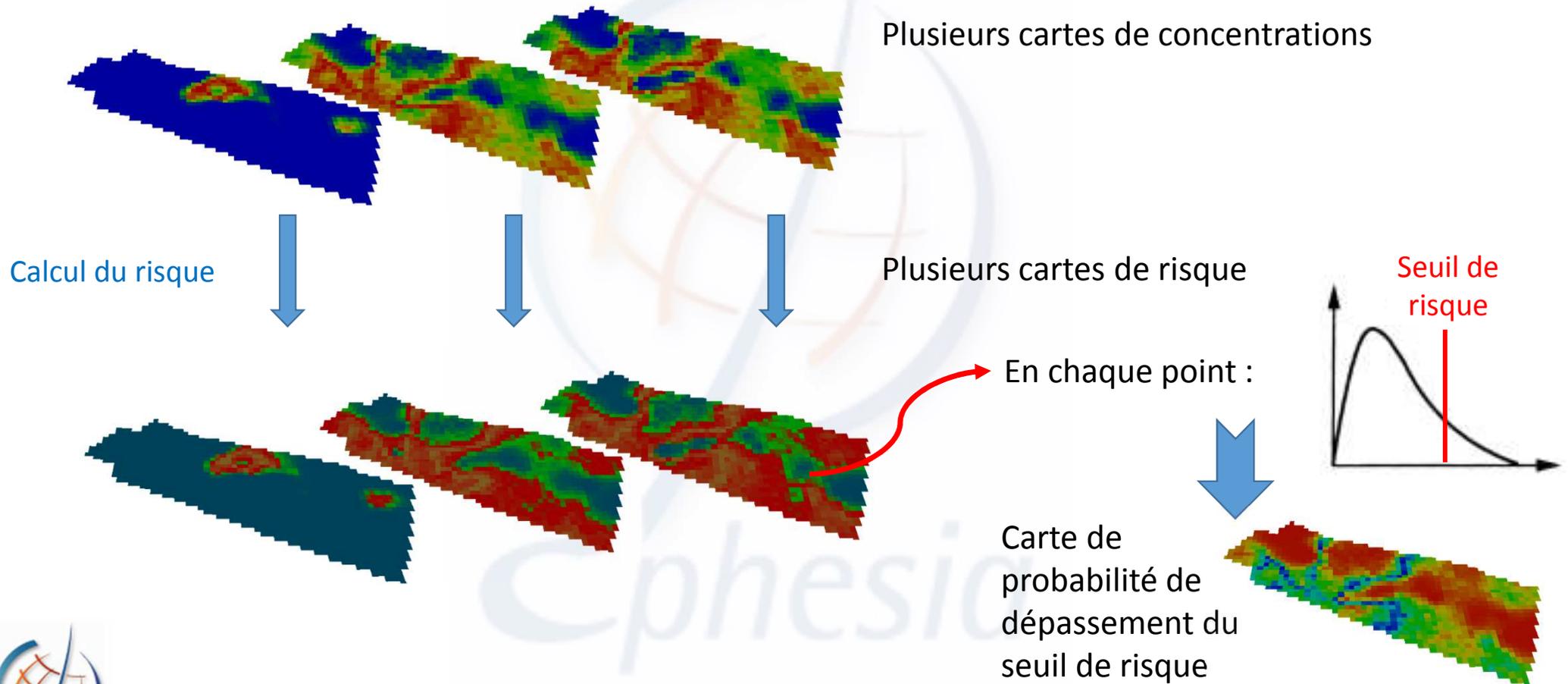


Aucune spatialisation des risques ni quantification des incertitudes

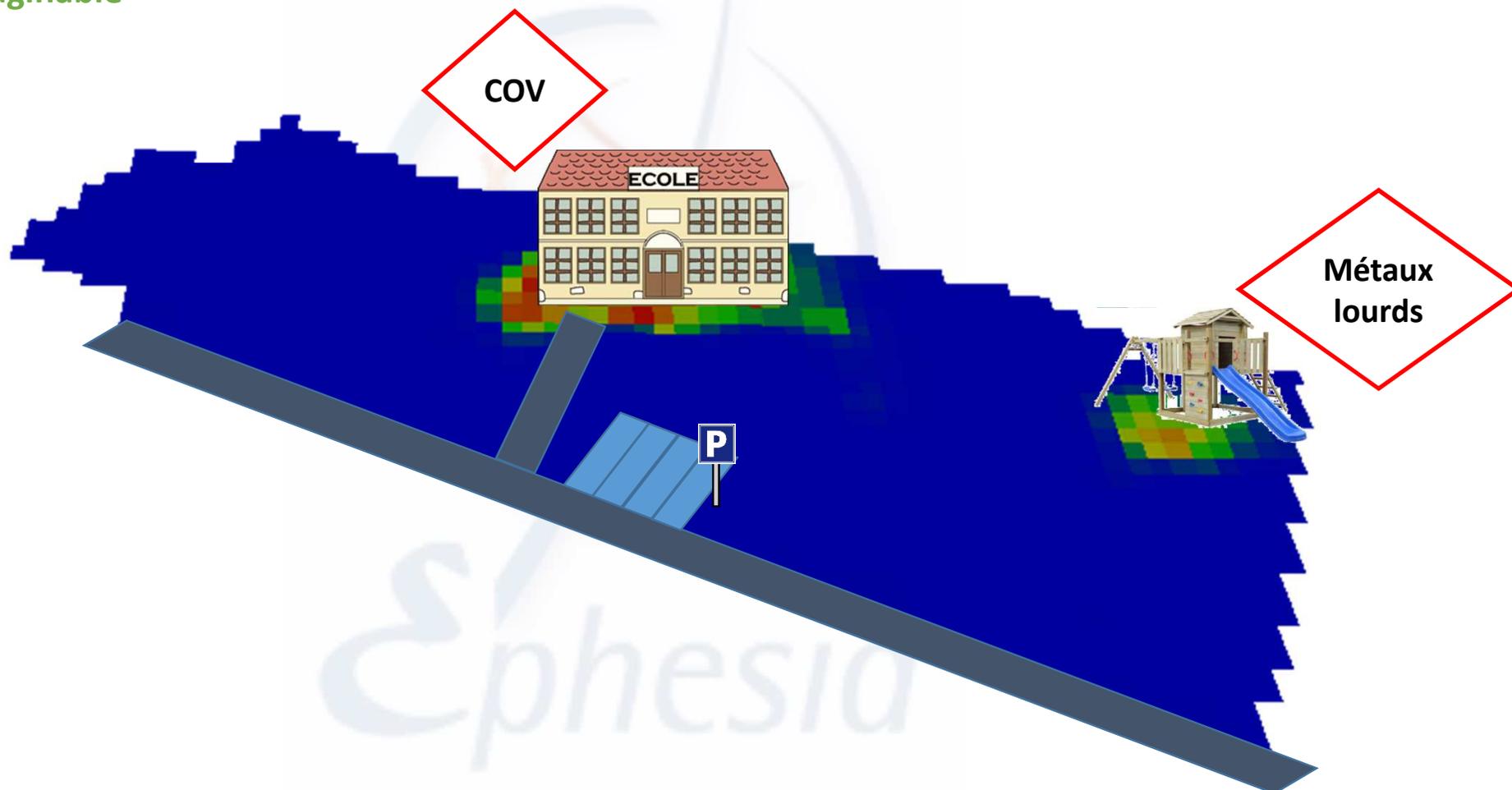
Solution imaginable : **Spatialisation des risques**



Solution imaginable : Spatialisation des risques + quantification des incertitudes !



Solution imaginable



Conclusions

Ephesia

La géostatistique :

1. **n'est pas la panacée** => l'utiliser à bon escient.
2. **ne fournit pas LA vérité**, elle propose un modèle qu'il faut interpréter avec esprit critique.
3. **propose une démarche scientifique explicite** qui permet d'objectiver les résultats et d'en assurer la reproductibilité.
4. permet de **valoriser toutes les données disponibles** et les caractéristiques de leur répartition spatiale.
5. permet de **quantifier les incertitudes** sur les résultats et donc de prendre des décisions en connaissance de cause.

Gestion des sols pollués

Certificat d'université en gestion des sols pollués

Prochaine session: début en novembre 2018

Contexte

Fort de son expertise dans la gestion des sols, la faculté de Gembloux Agro-Bio Tech organise une formation complète reprenant de nombreux aspects relatifs à la gestion des sols, comprenant notamment la caractérisation d'un sol, la description des polluants et leur détection, les techniques d'assainissement, les aspects législatifs,...

La division du certificat en plusieurs modules permet aux participants d'approfondir leurs connaissances dans l'un ou l'autre domaine, en fonction de leurs intérêts.

A qui s'adresse la formation?

Cette formation est destinée aux personnes susceptibles d'intégrer la problématique de la gestion des sols pollués dans le cadre de leur profession (bureaux d'études, développeurs, administrations publiques, conseillers en environnement, entreprises, etc....) ou aux personnes qui souhaitent réorienter leur carrière dans le domaine de la gestion des sols pollués.

Lieu de la formation

**Université de Liège (ULg),
Gembloux Agro-Bio Tech**
Passage des Déportés 2
5030 Gembloux

Prix de la formation

700€ TTC par module ou 4000€ TTC pour la formation complète.
Les frais d'inscription comprennent les supports de formation.

Possibilité de tarif réduit (demandeur d'emploi): n'hésitez pas à nous contacter

Inscription

Veuillez nous renvoyer le formulaire d'inscription à l'adresse:
formationcontinue.gembloux@uliege.be

Date limite: 15 octobre 2018

Attention, le nombre de places est limité à 40 personnes maximum et est de 10 minimum.

Merci pour votre attention !