Volumes de terres à dépolluer : Optimisation par Modélisation Analytique Inverse (IAM)

Alexis GRIS

07/10/2025

L'estimation des volumes de sols pollués est un enjeu majeur afin de limiter les impacts financiers, sanitaires, environnementaux mais aussi opérationnels lors des travaux de dépollution.

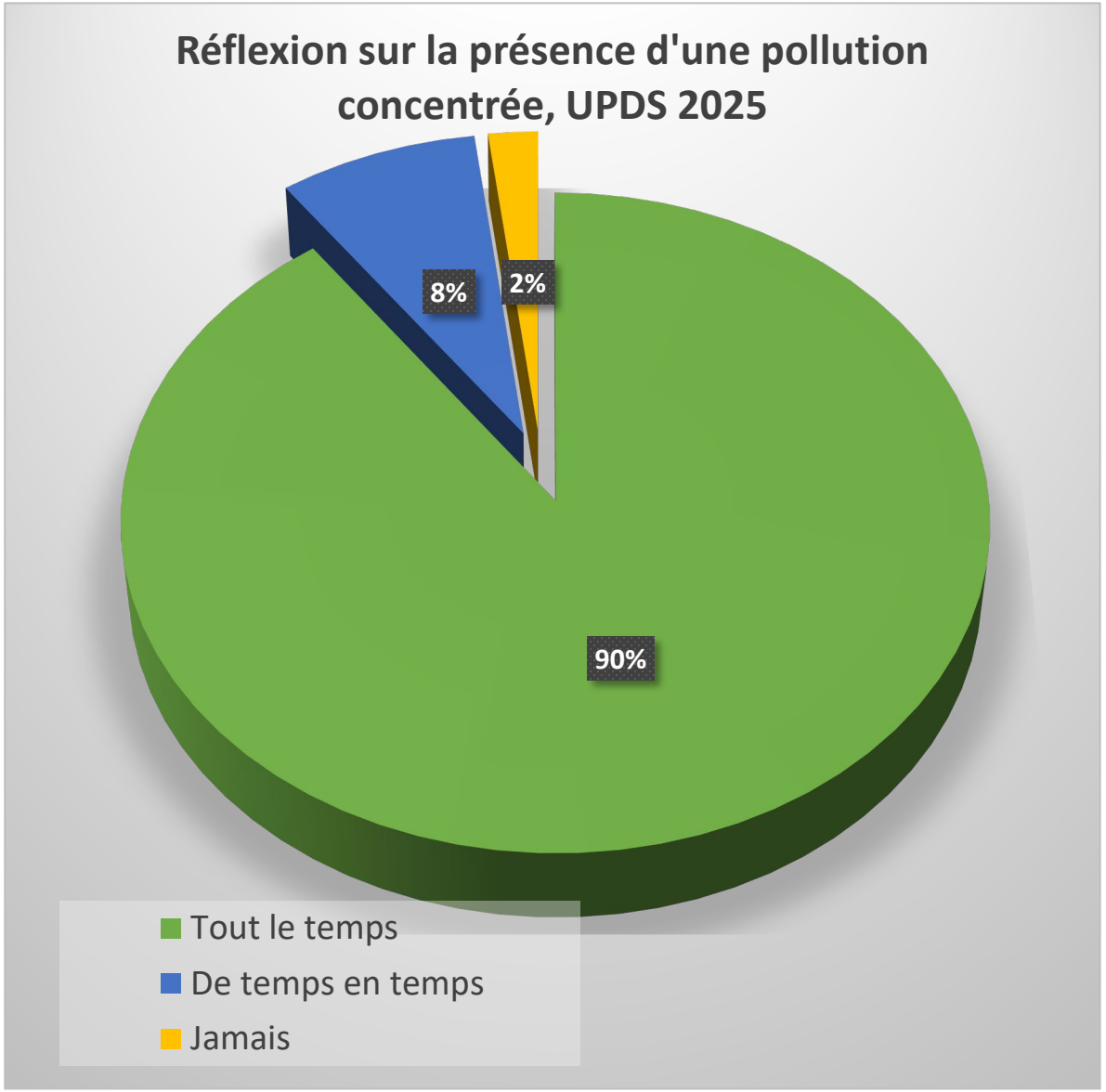
Le marché de la dépollution des sols estimé à 1Md€ (XERPI, 2020).



Les estimations de volumes sont intégrées dans la démarche pollution concentrée (UPDS, 2016).

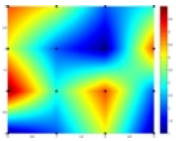
Méthode 4 : Cartographie fondée sur des méthodes déterministes (krigeage, plus proche voisin, triangulation, inverse distance…)

Méthode 6 : Approche intégrée géostatistique (krigeage avec variogramme et simulations)





Selon l'enquête UPDS, 2025 :



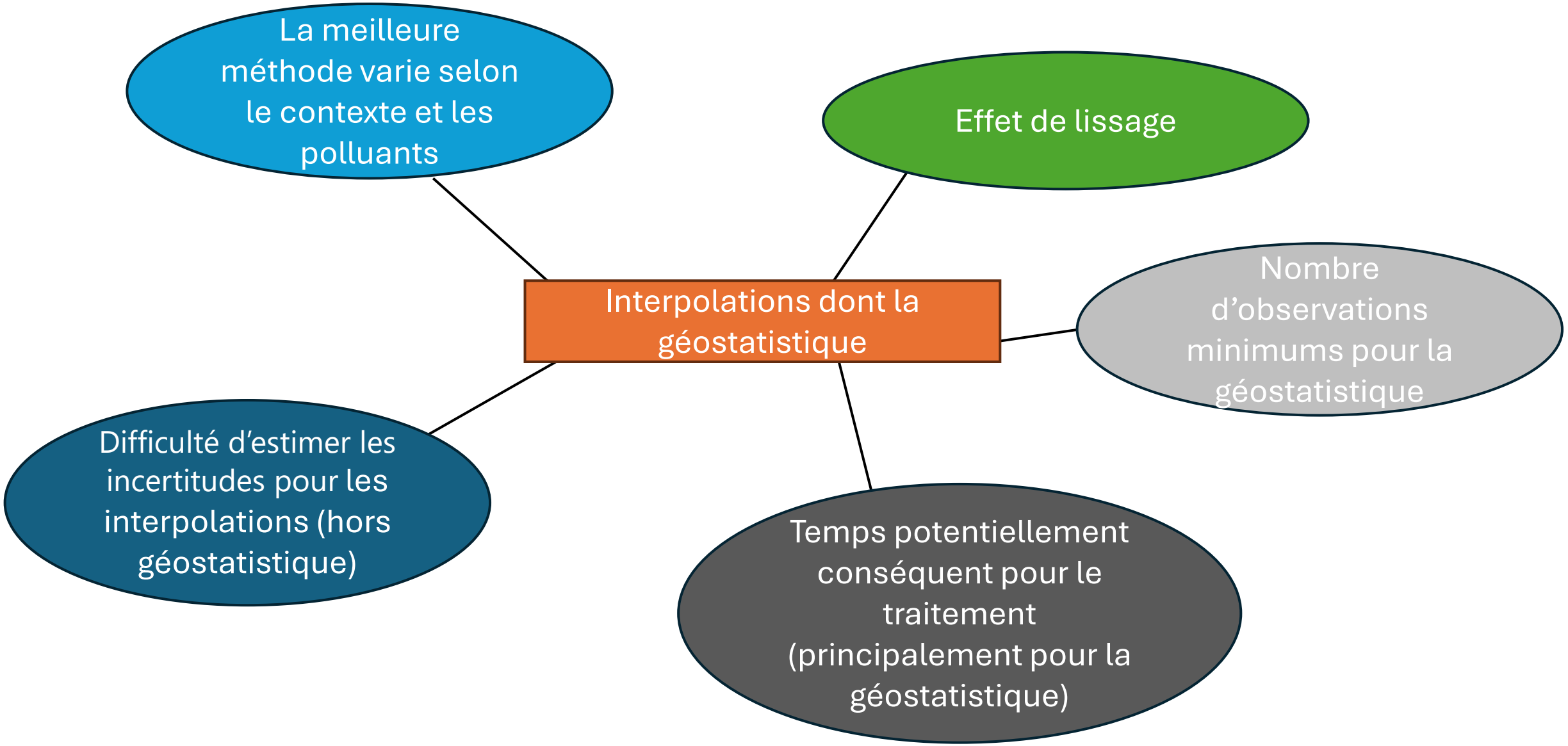
81 % des utilisateurs du guide pollution concentrée ont recours à des logiciels d'interpolation.



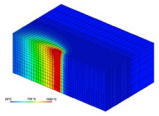
Les utilisateurs indiquent que l'interpolation n'est pas considérée comme adaptée lorsqu'il n'y a pas assez de données ou le milieu souterrain est hétérogène…



Seuls 30 % des utilisateurs du guide pollution concentrée utilisent la géostatistique, celle-ci est jugée trop complexe.


La meilleure méthode varie selon le contexte et les polluants
Effet de lissage
Interpolations dont la géostatistique
Nombre d'observations minimums pour la géostatistique
Difficulté d'estimer les incertitudes pour les interpolations (hors géostatistique)
Temps potentiellement conséquent pour le traitement (principalement pour la géostatistique)

Autre solution ?



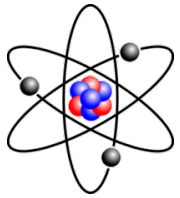
Modélisation numérique : complexe et peu utilisée en zone non saturée (manque de paramètres mesurables, équations complexes, temps de calcul conséquents…).



Méthode utilisant de l'intelligence artificielle : peu de méthodes avancées donnant satisfaction pour le moment



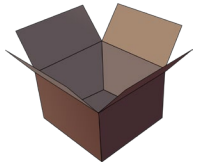
Objectif : Nouvelle méthode d'estimation des volumes potentiellement pollués



Basée sur les caractéristiques du site / polluant



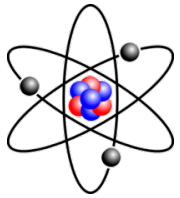
Facilement utilisable



Avec un faible nombre de données disponibles



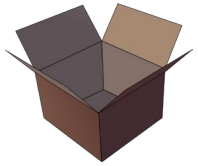
Objectif : Nouvelle méthode d'estimation des volumes potentiellement pollués



Basée sur les caractéristiques du site / polluant

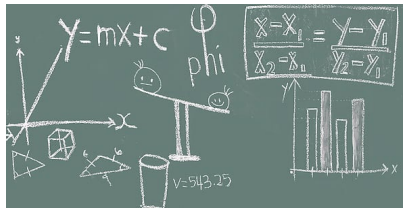


Facilement utilisable



Avec un faible nombre de données disponibles





Utilisation d'une solution analytique



Qu’est ce qu’une solution analytique ?



Equation mathématique exacte décrivant un ou plusieurs phénomènes (écoulement, dispersion, volatilisation…)

✓ *

Simplification importante avec des hypothèses d’homogénéité du milieu, écoulement uniforme en régime permanent et géométrie simple



Continue dans le temps et l’espace, estimation en 3D possible



Solution analytique

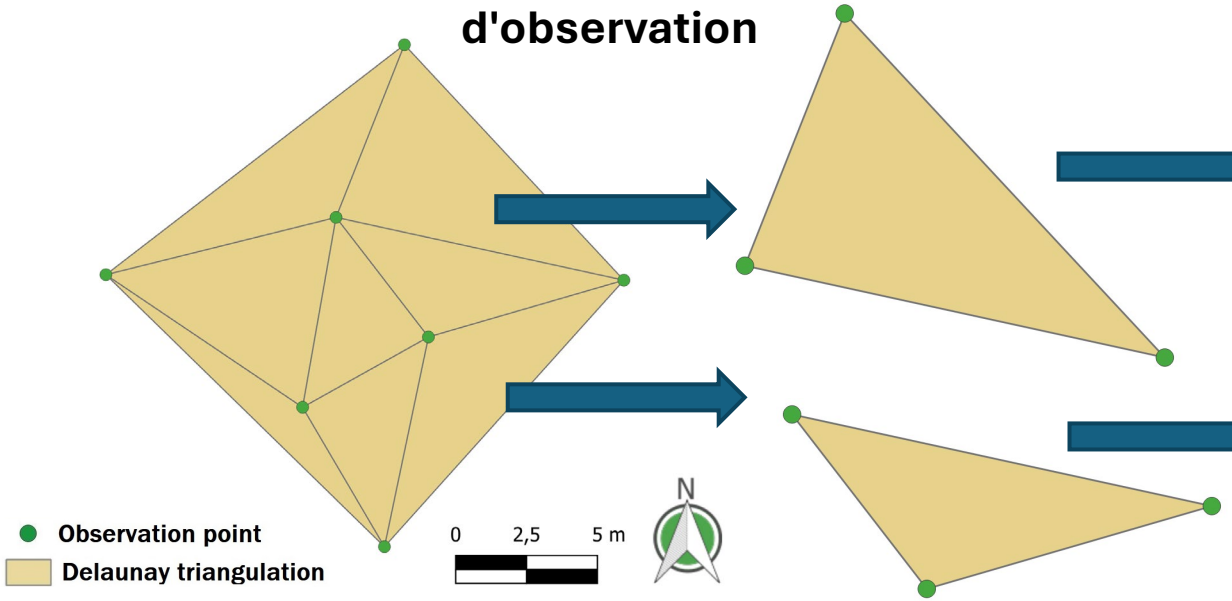
Nécessite des paramètres liés au site : la majeure partie des paramètres (sol, sites et polluants) n'est pas connue

➔ Adaptation des paramètres du modèle à des gammes de valeur possibles (inversion)

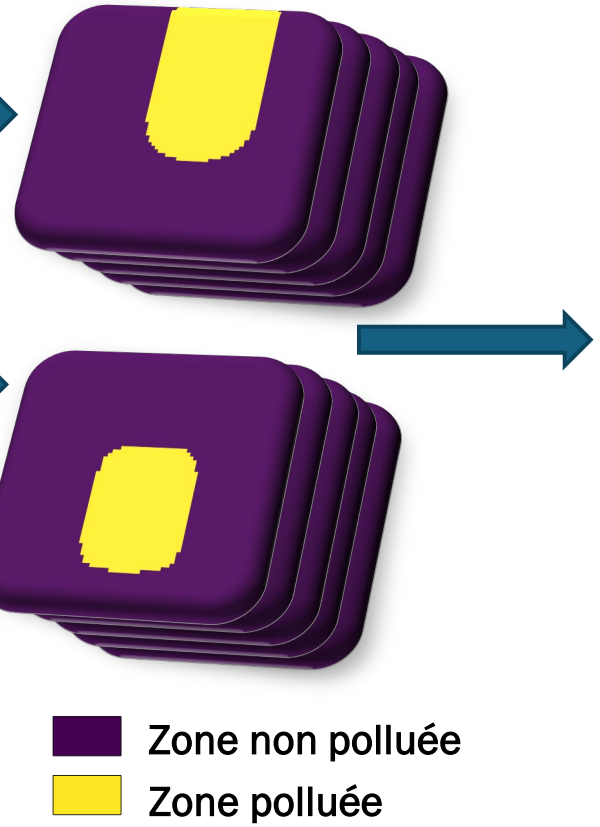
Le modèle suppose que le terrain est parfaitement uniforme (homogène)

➔ Application à des sous ensembles de points d'observation (triangulation de Delaunay).

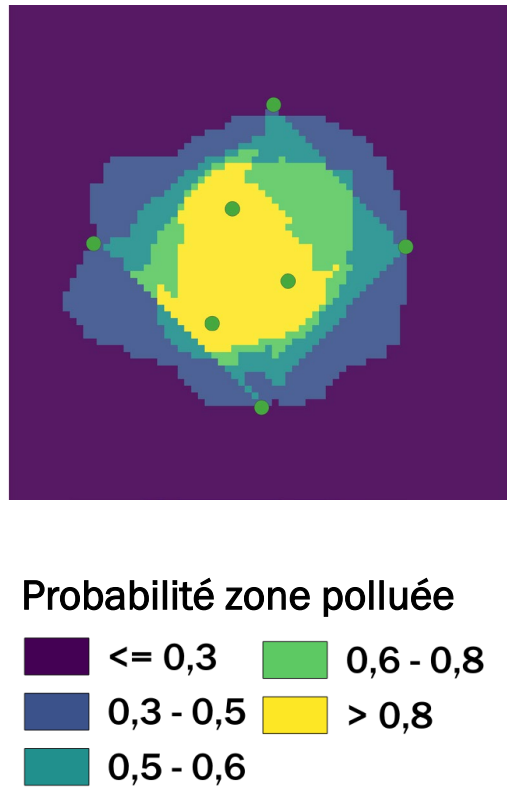
Application de la triangulation de Delaunay aux points d'observation



Inversion multiple d'un modèle analytique de transport



Combinaison des résultats

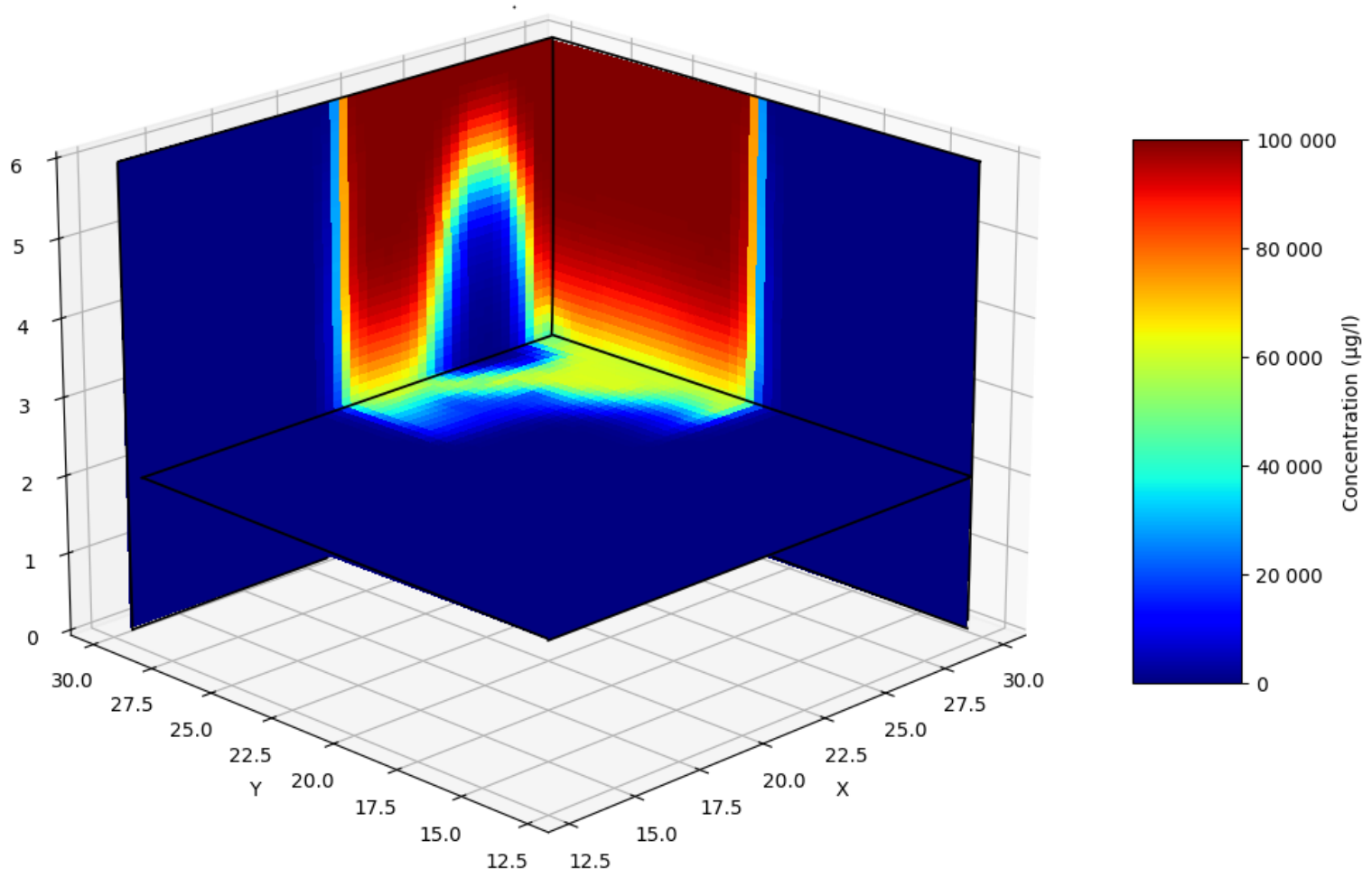


Modélisation écoulement et transport en ZNS sur MODFLOW USG d'une pollution en zone non saturée

Pollution entre 0 et 6m de profondeur

Volume connu (cas synthétique)

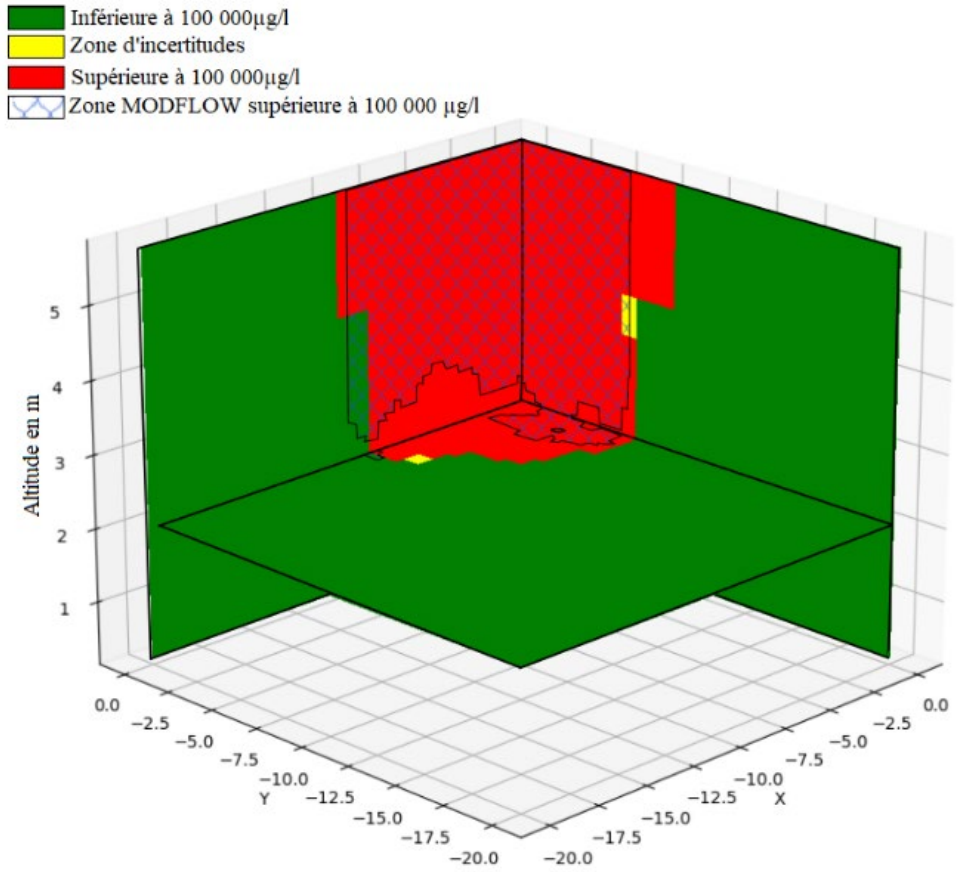
Hétérogénéité sur la porosité et la teneur en eau



Comparaison des volumes avec 3 méthodes d'interpolation :

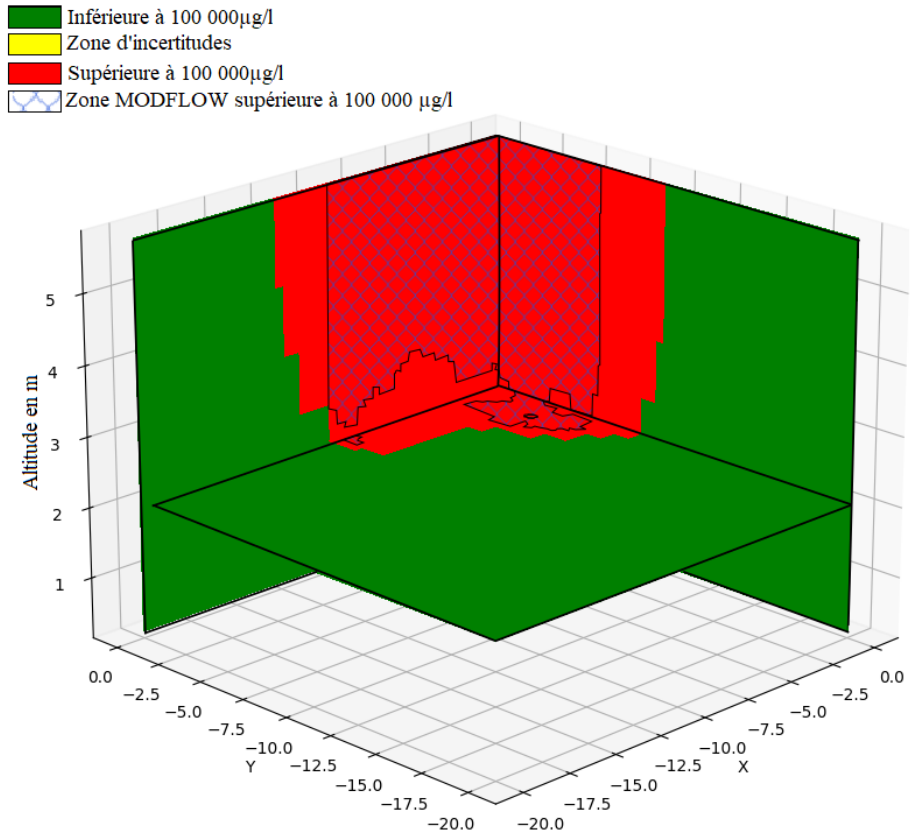
- Kriging ;
- Radial basis function ;
- Modified quadratic Shepard's.

IAM



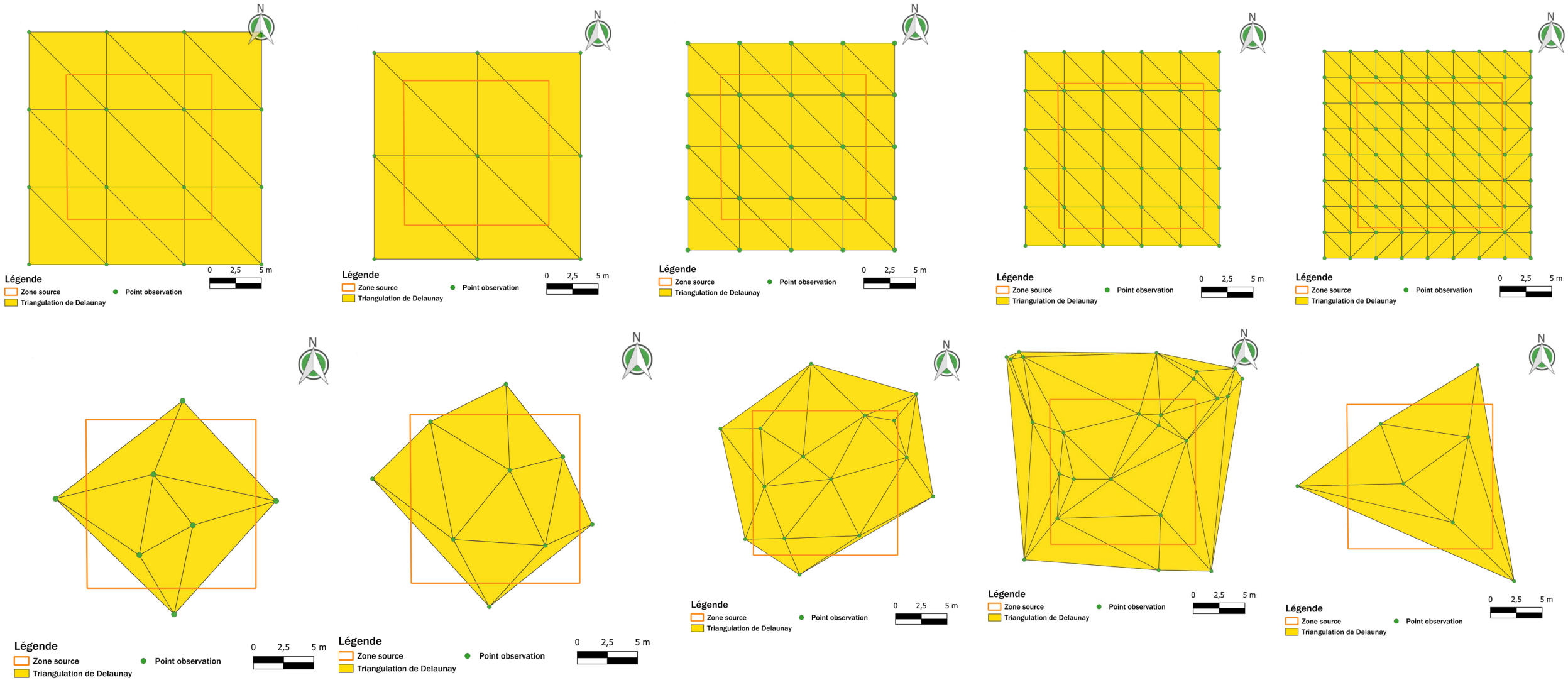
Erreur volume pollué : 23%

Meilleure interpolation

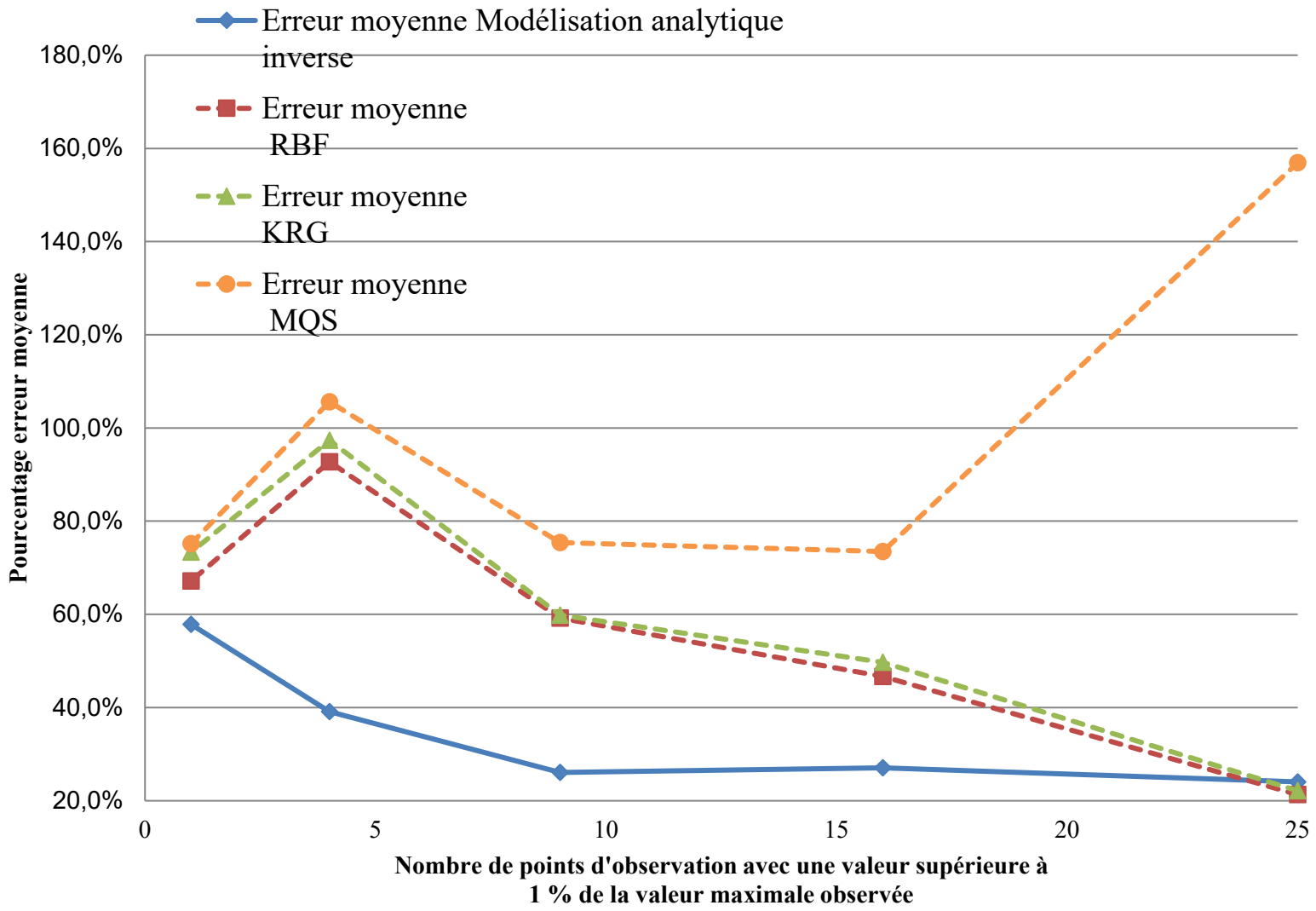


Erreur volume pollué : 59%

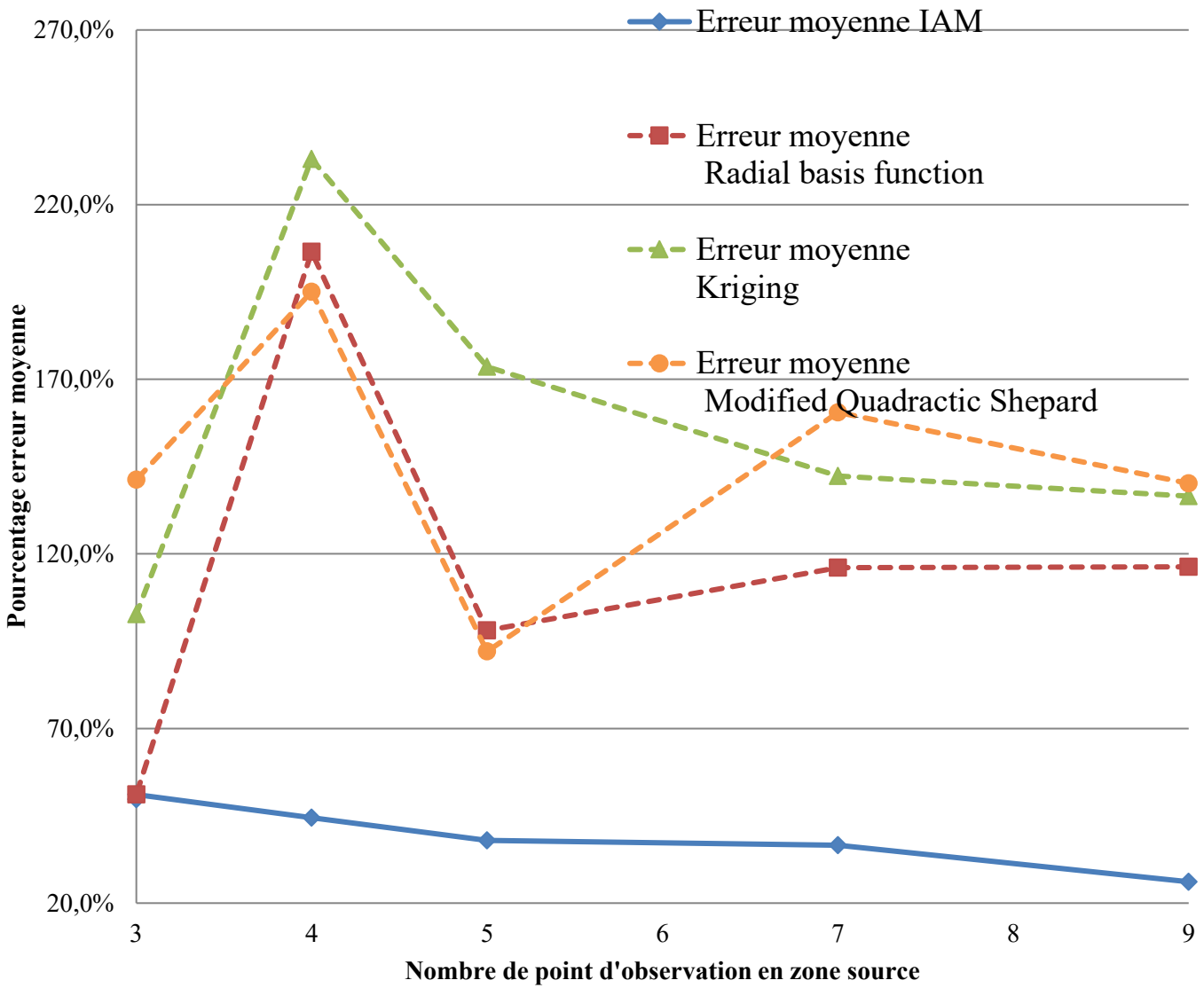
Réduction de l'erreur : 60 %



Distribution des points d'observation pour le cas synthétique

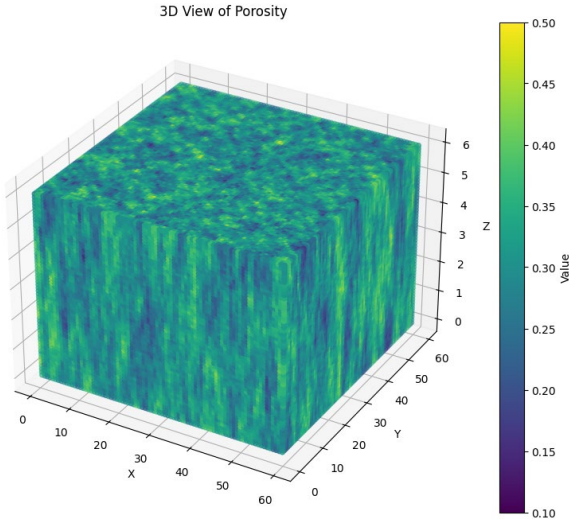


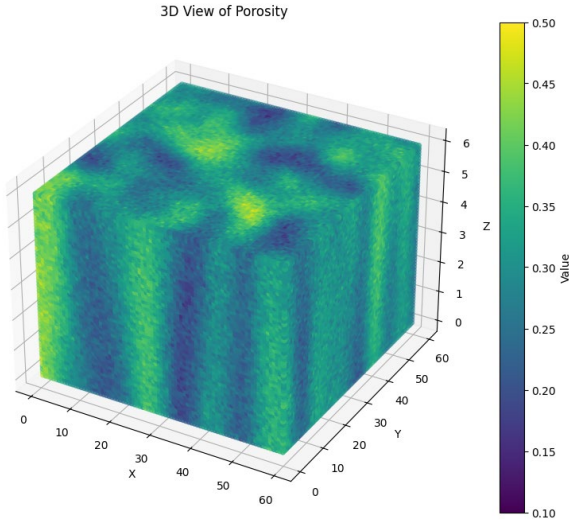
Résultats distribution des points régulière

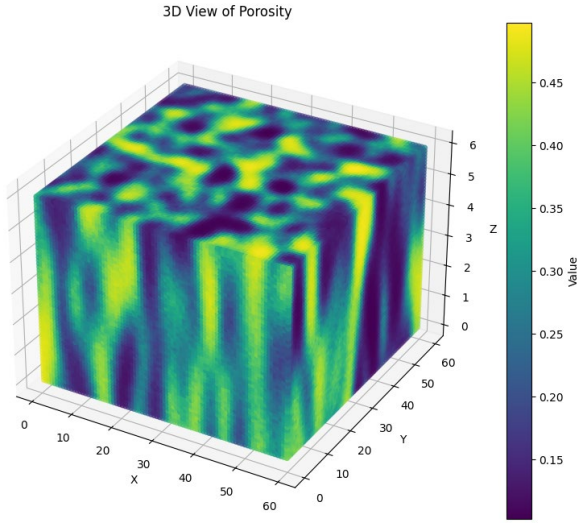


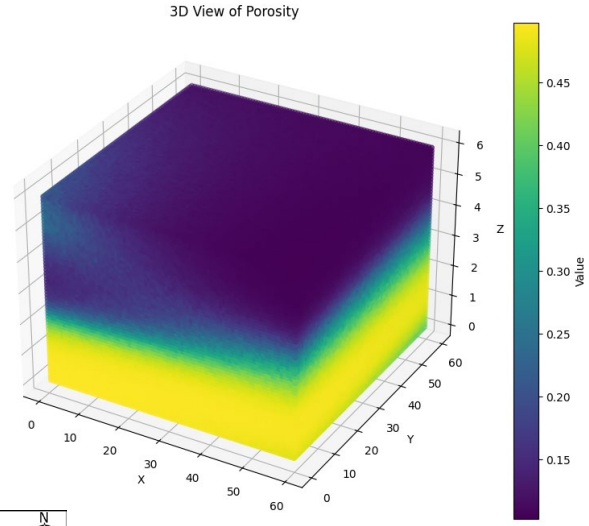
Résultats échantillonnage aléatoire-semi-aléatoire

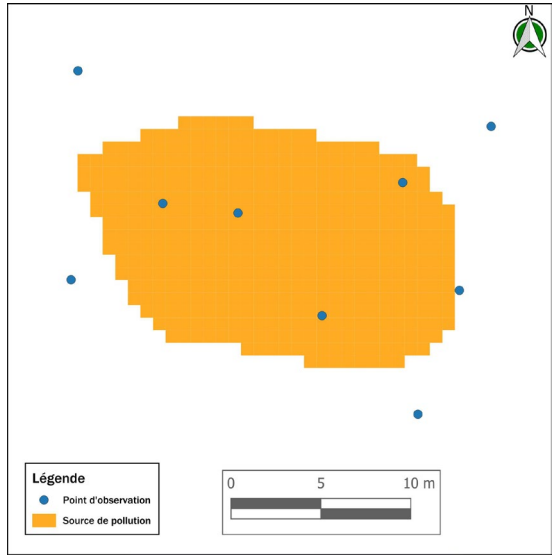
4 autres cas synthétiques

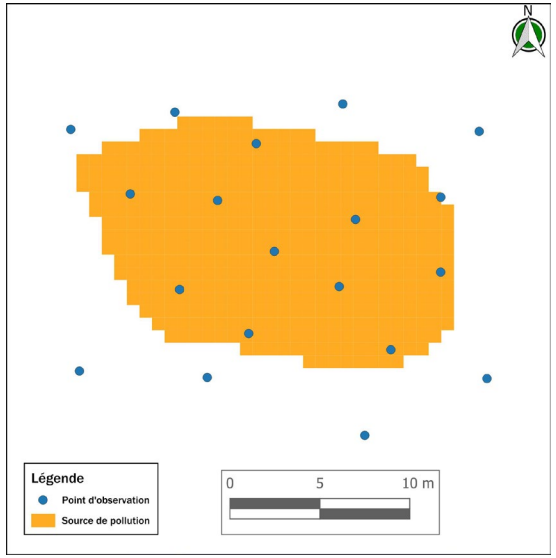




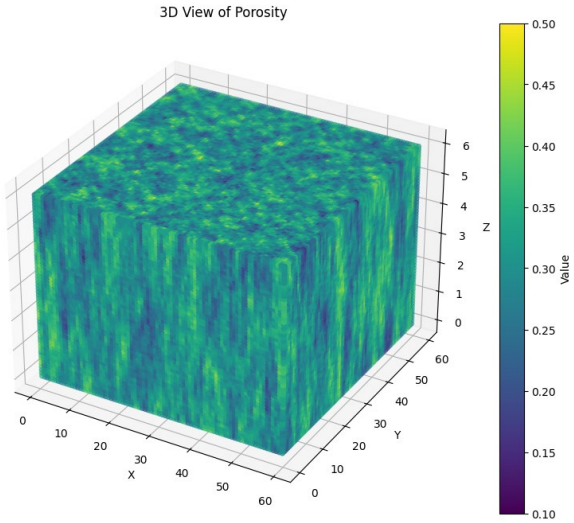


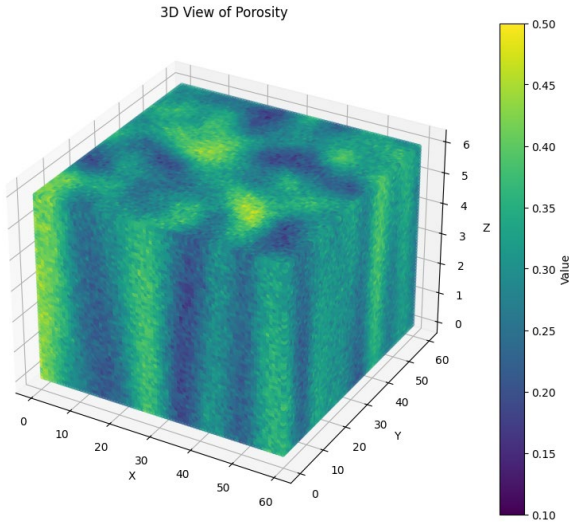


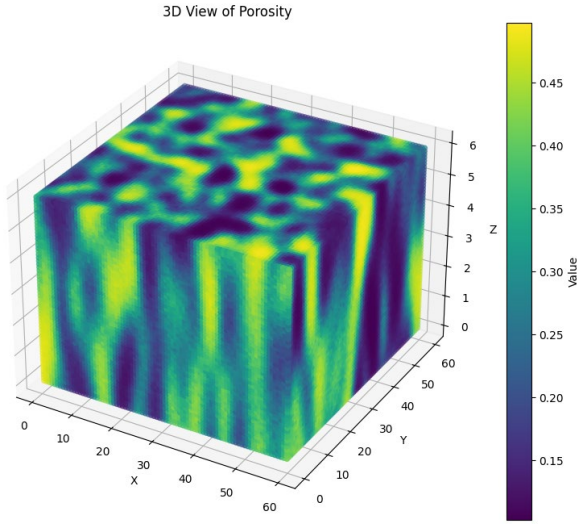


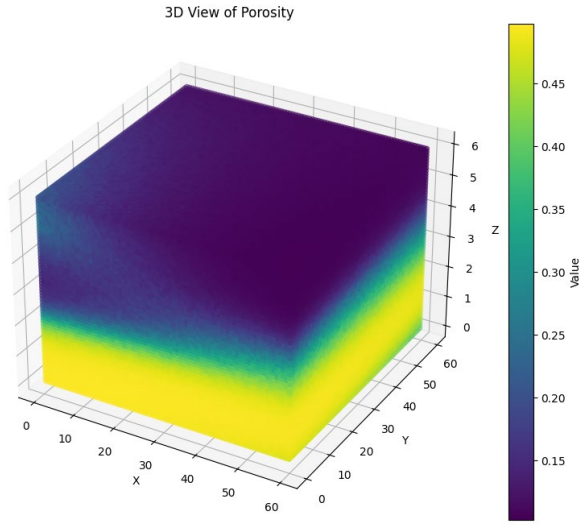


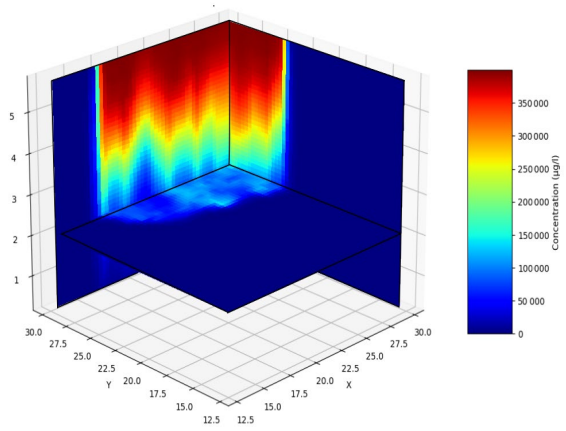
4 autres cas synthétiques

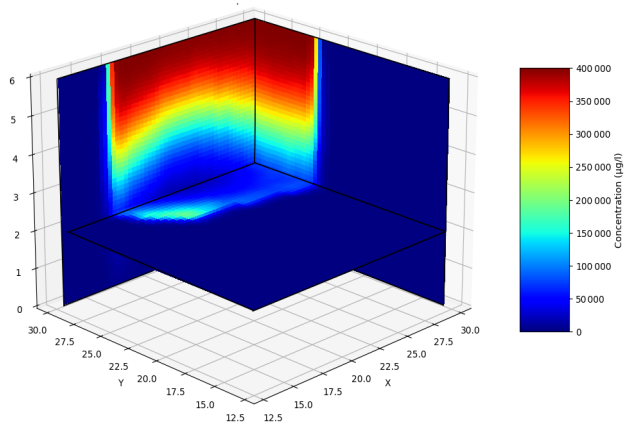


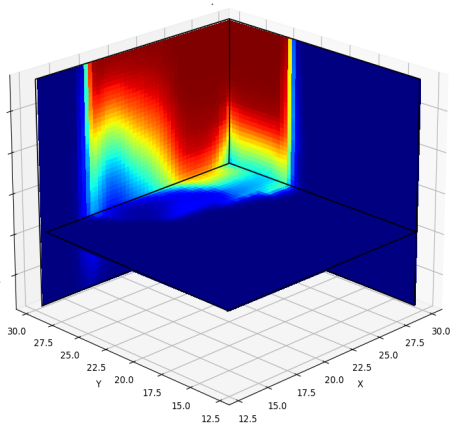


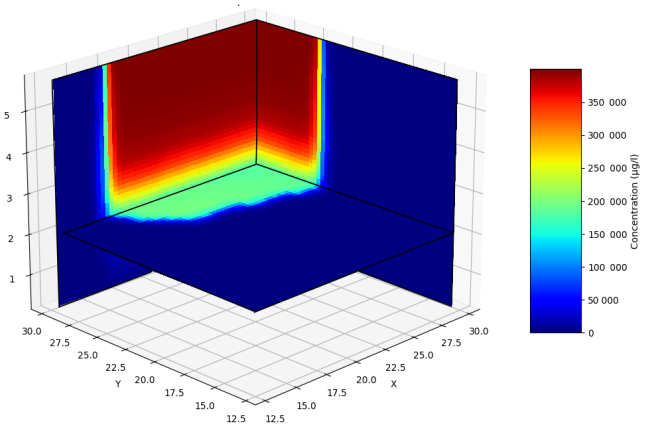




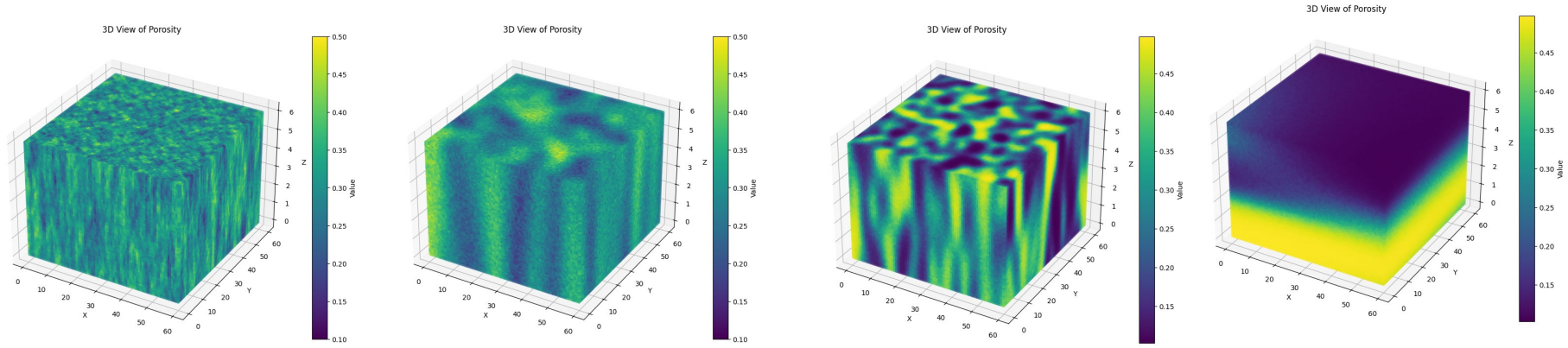








Sur 48 comparaisons, la Modélisation analytique inverse à de meilleurs résultats 45 fois



	Cas n°1		Cas n°2		Cas n°3		Cas n°4	
Nombre points d'échantillonnage	10	20	10	20	10	20	10	20
% erreur moyenne IAM	**37%**	**27%**	**49%**	**43%**	**44%**	**25%**	**30%**	**17%**
% erreur moyenne interpolation	136%	69%	162%	80%	175%	63%	93%	59%
% Réduction de l'erreur	**73%**	**61%**	**70%**	**47%**	**75%**	**59%**	**67%**	**71%**



Sables argileux

2 m de profondeur

Cuve de fioul aérienne fuyarde

11 sondages et 13 prélèvements



Contraintes d'accès pour les sondages

500 mg/kg MS en HCT C10-C40

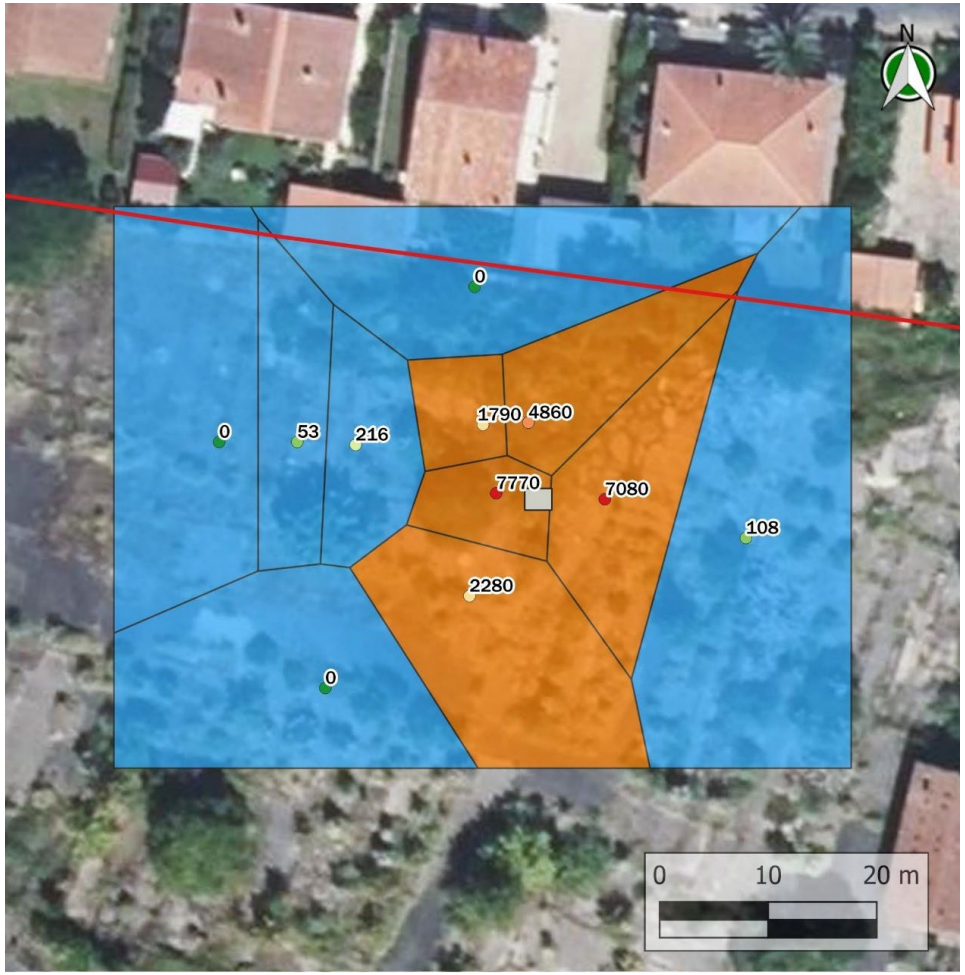


Incertitudes sur les surfaces polluées liées à l'emplacement des sondages



Peu d'interpolations adaptées, géostatistique impossible à appliquer compte tenu du faible nombre de points





Légende

Zone d'étude
Emplacement supposé de la cuve
Interpolation polygone de Voronoï
Inférieure à 500 mg/kg MS
Supérieure à 500 mg/kg MS
Teneur en HCT C10-C40 en mg/kg MS
0 - 15
15 - 150
150 - 1000
1000 - 2500
2500 - 5000
5000 - 7770



Légende

Zone d'étude
Emplacement supposé de la cuve
Interpolation plus proche voisin
Inférieure à 500 mg/kg MS
Supérieure à 500 mg/kg MS
Teneur en HCT C10-C40 en mg/kg MS
0 - 15
15 - 150
150 - 1000
1000 - 2500
2500 - 5000
5000 - 7770



Sondages complémentaires avec réalisation d'échantillons composites par maille



Volume de terres polluées estimé à 735 m^3



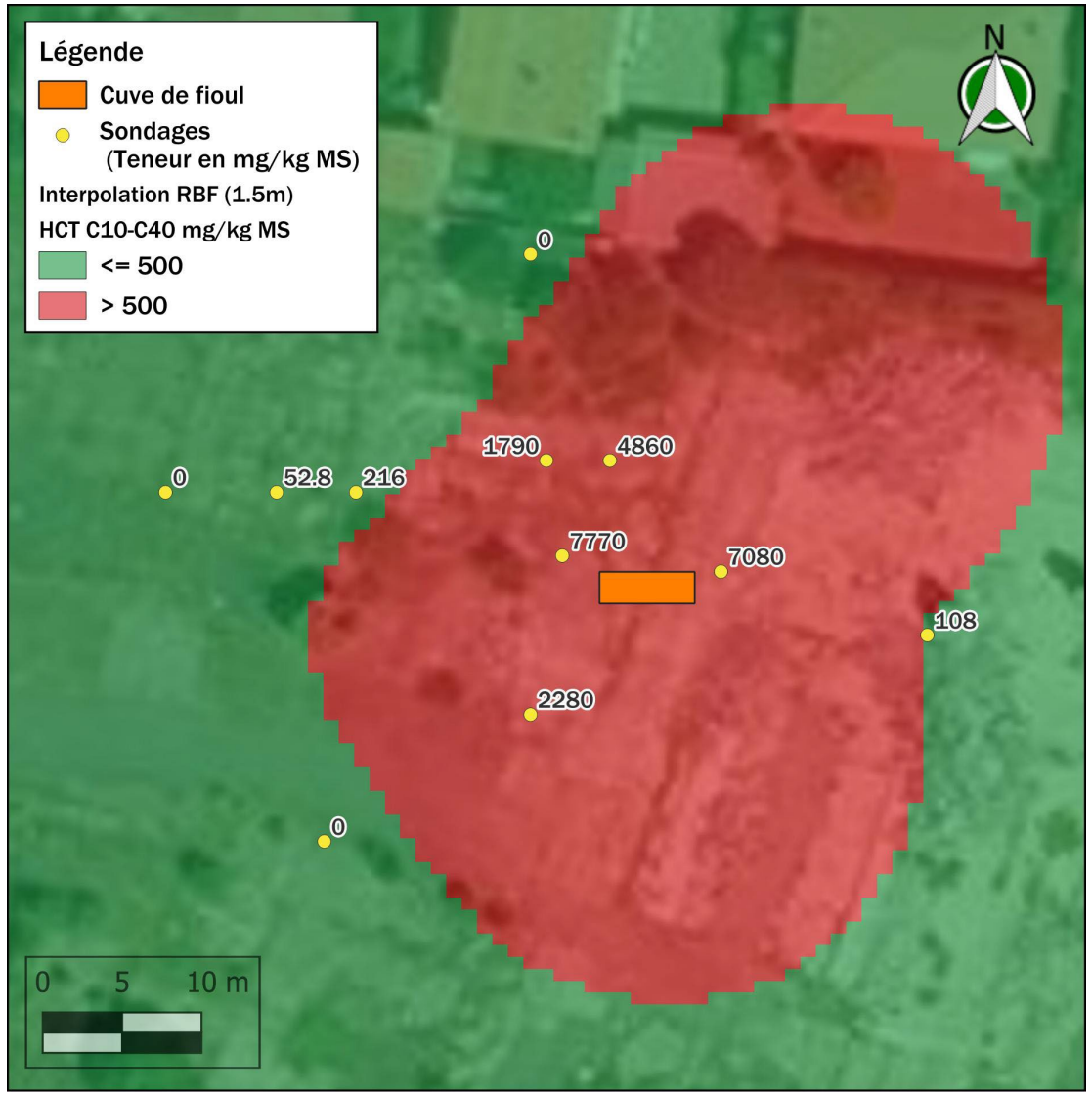
Interpolation (méthode RBF 3D)

Incertitudes au nord et au sud

Volume de terres polluées estimé à 3064 m^3

Volume probablement majorant

Erreur d'environ 147% (en considérant l'emprise des mailles présentées ci-avant)



Modélisation analytique inverse



Légende

Zone d'étude

Triangle où la modélisation inverse a été appliquée

Triangle non conservé pour la modélisation analytique inverse

Teneur en HCT C10-C40 en mg/kg MS

0 - 15

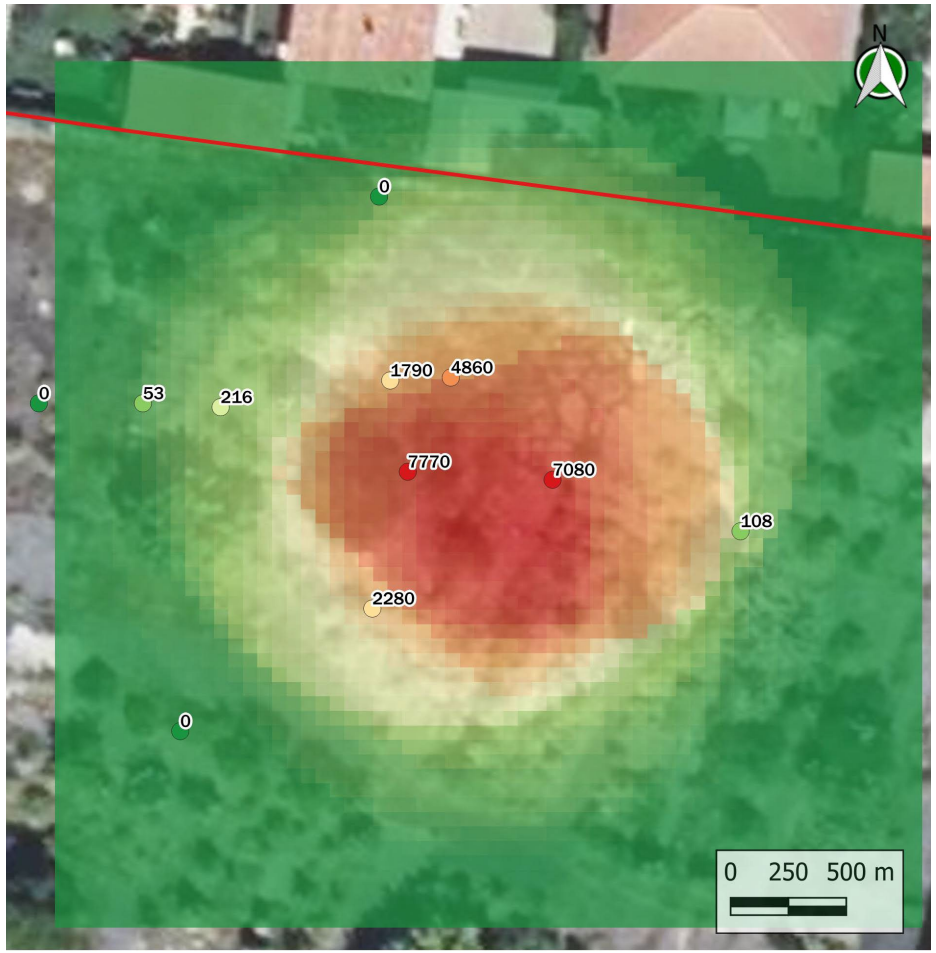
15 - 150

150 - 1000

1000 - 2500

2500 - 5000

5000 - 7770



Légende

Zone d'étude

Sondage

(teneur en mg/kg MS)

0 - 15

15 - 150

150 - 1000

1000 - 2500

2500 - 5000

5000 - 7770

% modèle >500 mg/kg MS

100

0

Modélisation analytique inverse



Volume de terres polluées estimé entre 940 et 1220 m^3
La valeur médiane est à environ1080 m^3

Erreur d'environ 47% (par rapport aux mailles)

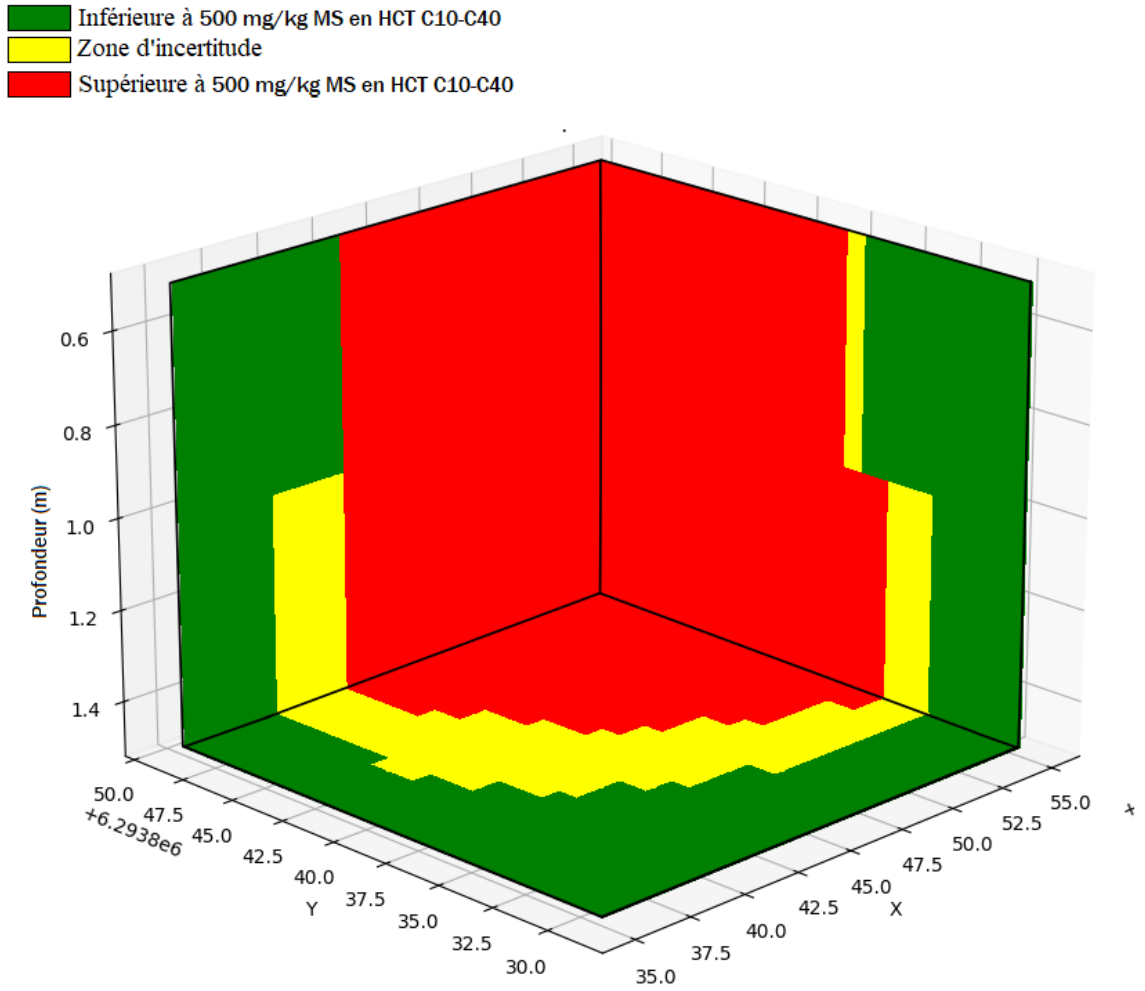


Modélisation analytique inverse



Volume de terres polluées estimé entre 940 et 1220 m^3
La valeur médiane est à environ1080 m^3

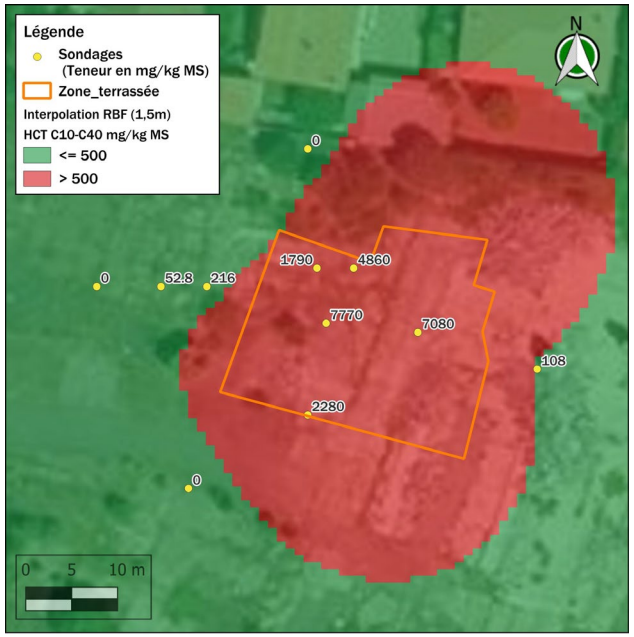
Erreur d'environ 47% (par rapport aux mailles)



Après travaux de dépollution

Volume de terres polluées terrassé à environ 1060 m³ (hors talus)

Erreur interpolation à environ 80% (zone terrassée)



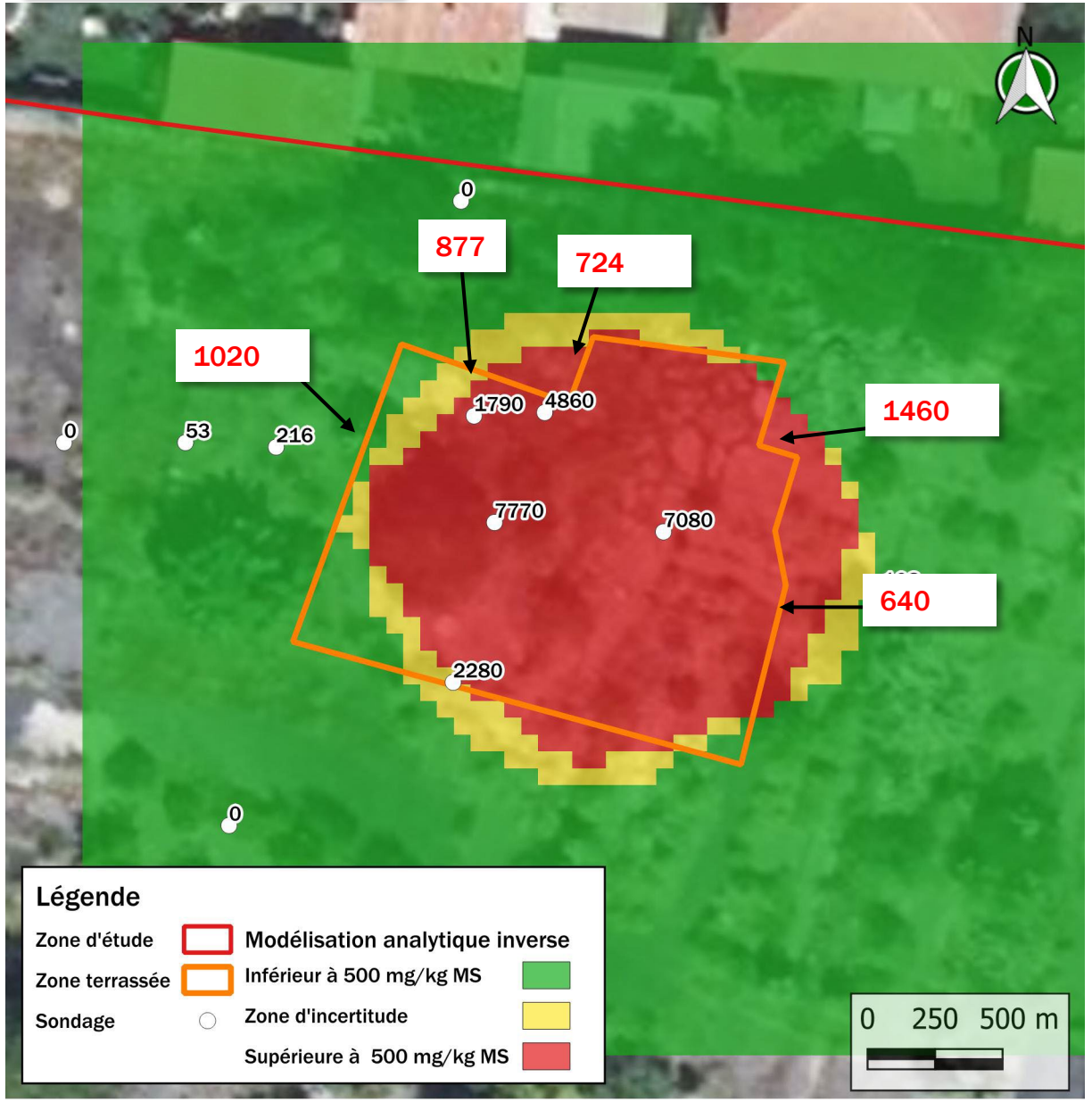


Après travaux de dépollution

Erreur d'environ 34% (zone terrassée)

Diminution de l'erreur par rapport à l'interpolation de 65%.

Par rapport au programme initial, trois reprises des bords de fouille ont dû être réalisées



Base de données créée spécifiquement

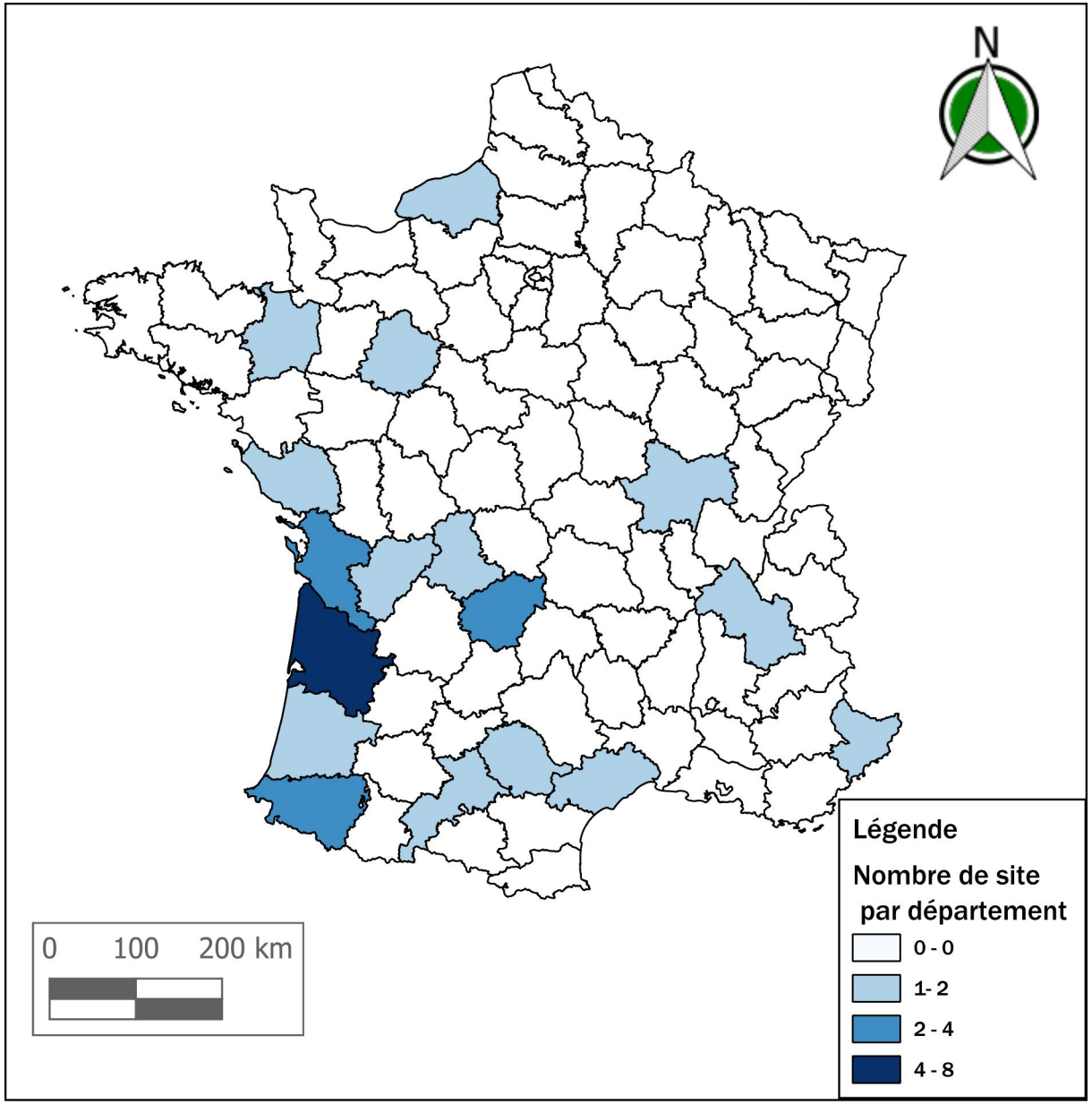
Tester la méthode sur un grand nombre de sites



32 sites composant la base de données



Base de données en ligne (Zenodo)



Conditions de réalisation de la base de données



Dépollution par excavation (avec prélèvements en bords de fouille)



Données de localisation précise (relevé de la fouille par géomètre à minima)

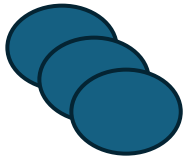


Source(s) de pollution

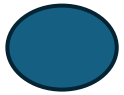


Non intégration des fonds de fouille

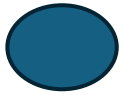
Polluants intégrés



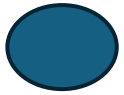
Hydrocarbures totaux (C10-C40) → Fioul, Gazole, Huiles



COHV



PFAS (PFOS)



Pentachlorophénols

Pas de BTEX, ni HAP, des pollutions avec ces composés sont présentes mais le traceur retenu est les hydrocarbures

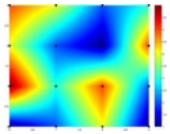
Quelques statistiques sur les données diagnostic de pollution



Moyenne de sondage à 9,8 pour dimensionner une pollution concentrée (4 à 23 sondages)



Moyenne de prélèvement à 14 pour dimensionner une pollution concentrée (4 à 42 prélèvements)



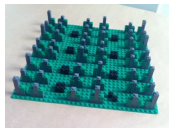
Les méthodes retenues à l'issue du plan de gestion pour délimiter les zones à dépolluer sont majoritairement le tracé à main levée puis les polygones de voronoï

Des interpolations sont faites dans les plans de gestion mais ne sont pas ou peu retenues comme zone à terrasser

Quelques statistiques sur les données dépollution des sols



Taille des fouilles moyenne de 275m² (de 10 à 2000 m² représentant à 6 à 8000 m^3)



Densité moyenne de 1 sondage/50 m² (de 5 à 250 m²)



Moyenne bords de fouille prélevé à l'issue des travaux 6,1 (de 2 à 15 bords de fouille)



Moyenne de dépassement en bord de fouille à l'issue des travaux 1,3 (de 0 à 6 bords de fouille)

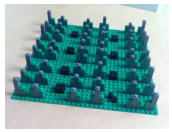
Résultats

80,4 % de conformité pour les bords de fouille (194) dépassant ou non les seuils considérés

17,1 % des bords de fouille sous-estimée (7 sur 41)

21,5 % des bords de fouille surestimés (33 sur 153)

Résultats

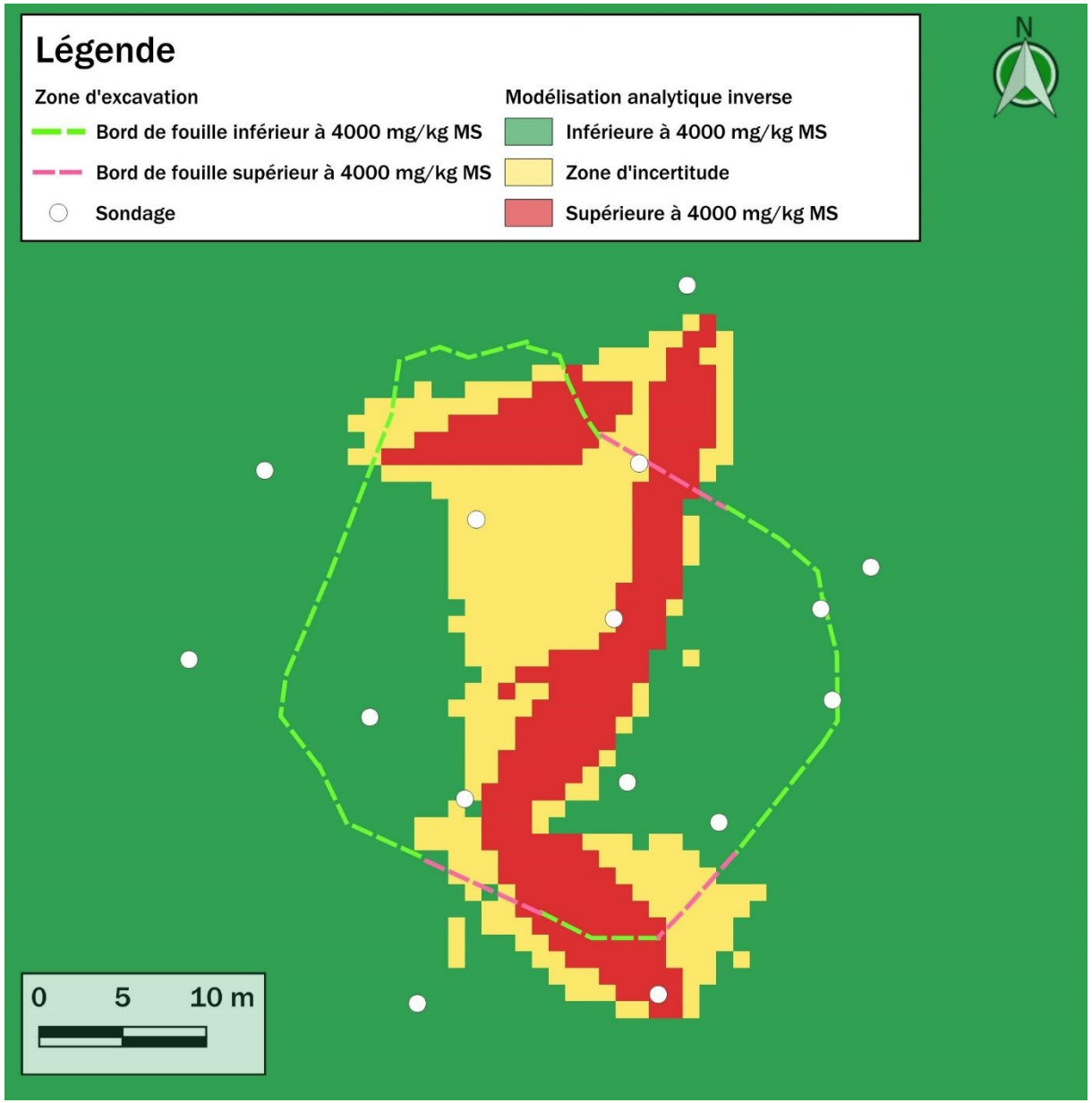


Pas d'influence de la densité de sondage sur les résultats de la méthode

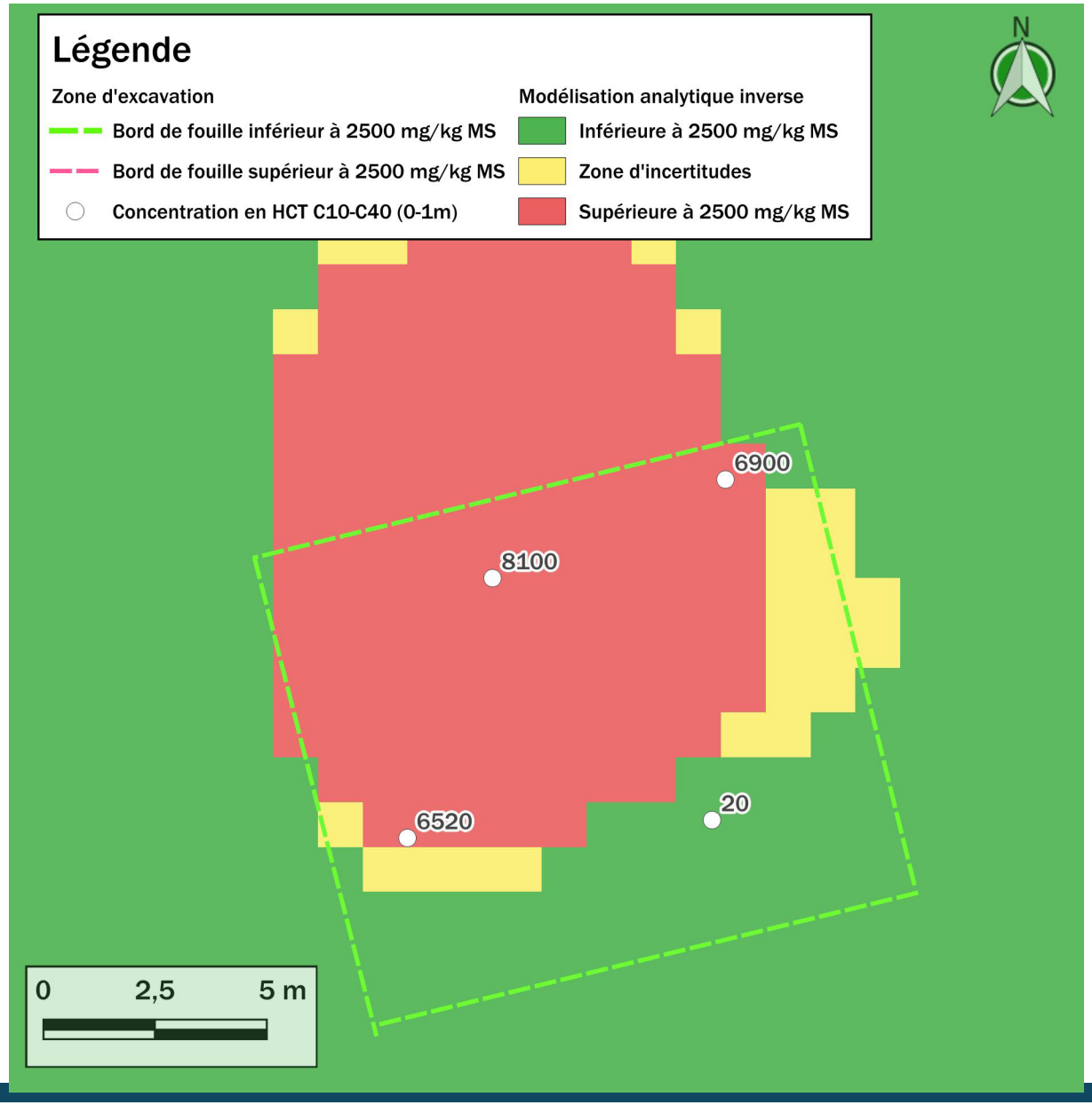


Pas d'influence de la lithologie (argiles à 74%, sables 82%, limons 90%, remblais hétérogènes 84,6%).

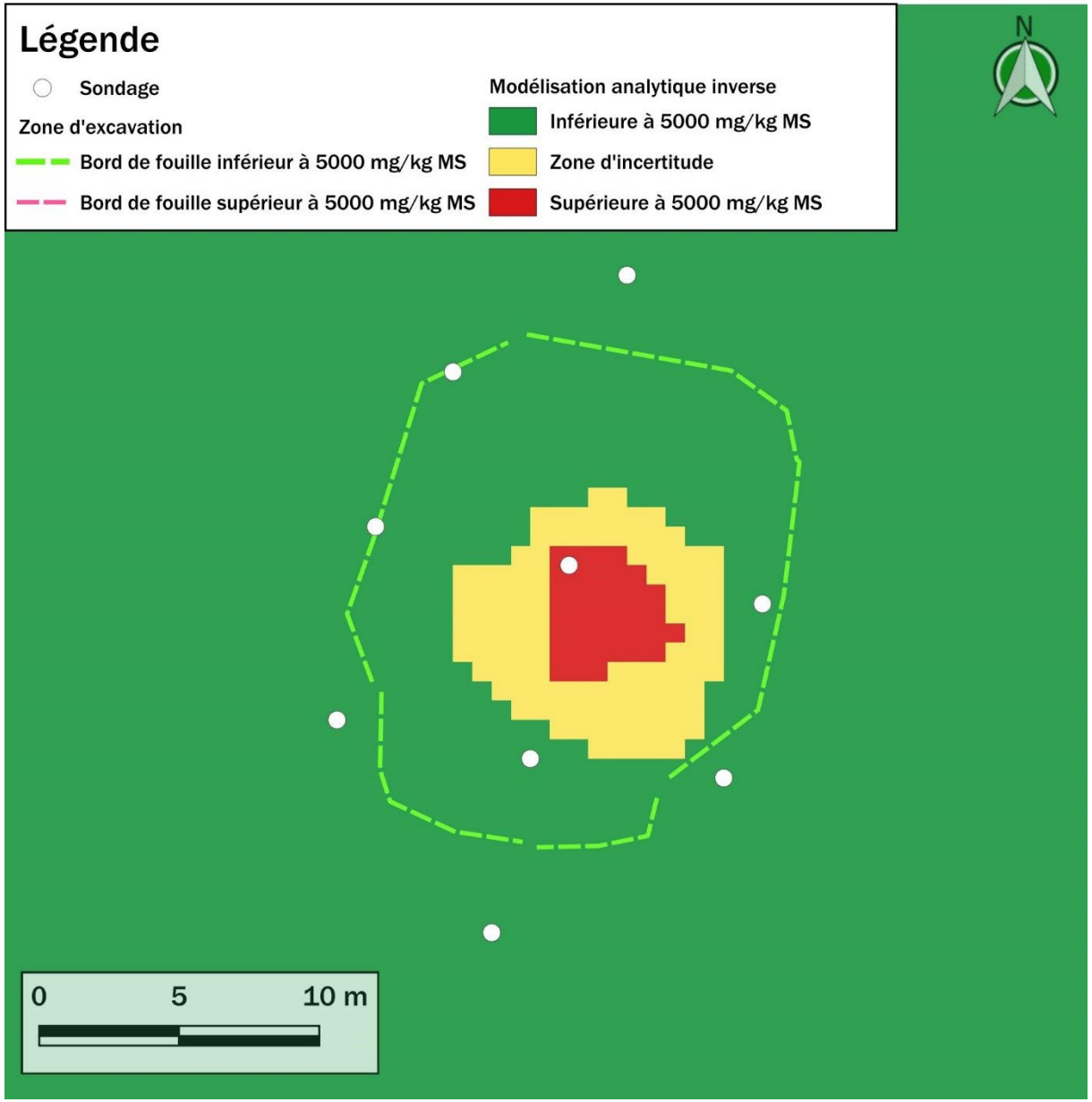
Quelques exemples



Quelques exemples



Quelques exemples



- La modélisation analytique inverse permet d'optimiser les volumes de terre de 40 à 70% d'erreur en moins que les interpolations pour les cas synthétiques testés
- Méthode testée (80 % de conformité) sur des cas réels issus d'une base de données de 32 sites
- La méthode permet d'obtenir une incertitude sur les volumes à dépolluer
- Application possible de la méthode en zone saturée pour identifier des panaches dans les eaux souterraines

Merci pour votre attention

Alexis GRIS

alexis.gris@apave.com