

# Approche géostatistique appliquée à l'évaluation d'un état de pollution des sols dans le cadre d'une session de site industriel

Florine Garcia<sup>1,\*</sup>, Christian Cornet<sup>2</sup>, Michel H. Garcia<sup>1</sup>, Jean-Baptiste Mathieu<sup>1</sup>, Julien Dumont<sup>3</sup>

(1) KIDOVA, 155 av. R. Salengro, 92370 Chaville, France

(2) CETIM, 7 rue de la Presse, BP 802, 42952 St-Etienne Cedex 09

(3) SERPOL, 166 rue C. Nungesser, CS 30012, 34137 Maugeio Cedex

\* Auteur correspondant : [florine.garcia@kidova.com](mailto:florine.garcia@kidova.com)

## RÉSUMÉ

Cette étude porte sur l'estimation de masses de polluants en place à l'intérieur d'un site de production et sur la quantification de l'incertitude spatiale quant au positionnement de ces masses. Elle vise à produire un état de la pollution des sols actuelle avant la cession du site à un autre industriel. L'approche méthodologique proposée repose sur une modélisation géostatistique de la pollution des sols en utilisant une méthode dite de simulation qui permet de générer un grand nombre d'images 3D réalistes et équiprobables des teneurs en polluants d'intérêt dans les sols. Les images sont réalistes car elles reproduisent les données de teneur et leur variabilité spatiale observée. Elles sont équiprobables dans le sens où elles ont toutes la même probabilité de représenter l'état de pollution réel des sols. Comme résultats pour établir l'état de pollution du site avant cession, les simulations permettent de calculer la masse de polluants en place et l'incertitude associée, que ce soit sur l'ensemble du site ou par zone, et d'identifier avec confiance les endroits où les sols constituent ou non des sources de pollution potentielles et les endroits où leur niveau de pollution est encore incertain. Les sources de pollution sont définies sous la forme de seuils de dépassement de la masse de polluant cumulée verticalement au-dessus de la zone saturée.

**MOTS-CLÉS :** sols pollués, masses en place, source de pollution, géostatistique, incertitude

## ABSTRACT

This study focuses on the estimation of masses of contaminants in place inside a production site and the quantification of the spatial uncertainty related to the location of these masses. The aim is to provide an assessment of the current soil contamination (current status) before the transfer of the site to another industrial company. The proposed methodological approach relies on geostatistical modeling of the soil contamination by using a simulation method that generates a large number of realistic and equiprobable 3D images of grades for soil contaminants of interest. The images are realistic because they reproduce the grade data and their observed spatial variability. They are equiprobable in that they all have the same probability to represent the actual soil contamination. To assess the soil contamination before the site transfer, the masses of contaminants in place and the associated uncertainty can be estimated from the simulations, for the whole site or by zone. Using the simulations, it can be identified the locations where potential soil contamination sources are likely to be or not found with high enough confidence, and those where the soil contamination is uncertain. The sources of contamination are defined as corresponding to the areas where the vertical accumulation of contaminant mass exceeds some critical threshold above the saturated zone.

**KEYWORDS:** contaminated soils, masses in place, contamination source, geostatistics, uncertainty

## Approche géostatistique appliquée à l'évaluation d'un état de pollution des sols dans le cadre d'une session de site industriel

Florine Garcia, Christian Cornet, Michel H. Garcia, Jean-Baptiste Mathieu, Julien Dumont

### Introduction

Dans le cadre de la cession d'un site où la même activité industrielle sera exercée, il n'est pas obligatoire de traiter des sols qui seraient potentiellement pollués. Il est en revanche fortement recommandé pour l'industriel détenteur du site de déterminer l'état actuel de la pollution des sols avant la reprise du site par le nouvel acquéreur (loi ALUR 2016). Il s'agit d'établir un état zéro de la qualité des sols qui doit servir de référence que ce soit pour traiter les sources de pollution avant le changement de propriétaire, négocier la reprise du site avec sa pollution (tiers responsable) ou dégager la responsabilité du détenteur actuel par rapport à des pollutions futures. À notre connaissance, dans les cas de cession de site ne conduisant pas à un changement d'activité industrielle, la loi n'impose pas d'étude des risques sanitaires et ne formule pas de recommandations sur la façon dont l'état zéro doit être établi. Pour l'évaluer pleinement, il est utile d'estimer d'une façon ou d'une autre le stock de polluants en place et d'en déduire l'emplacement et l'étendue des sources de pollution possibles. Quantifier et prendre en compte les incertitudes associées à ces estimations n'est pas habituel mais paraît souhaitable pour que chacun, l'industriel cédant et celui qui se porte acquéreur, puisse juger de la conduite à tenir pour protéger ses intérêts (investigations complémentaires pour lever les incertitudes, négociation du prix de vente, dépollution des sols avant cession...).

Cet article présente une approche qui utilise la géostatistique pour estimer l'incertitude sur l'état zéro en termes de masses de polluants en place dans les sols et l'incertitude sur la répartition spatiale des polluants définie par rapport à un dépassement local de seuils, non connus mais jugés critiques, de quantités (masses cumulées verticalement) de polluants au-dessus de la zone saturée. L'approche méthodologique utilisée est d'abord présentée puis son application à un cas d'étude réel.

### I. Approche méthodologique proposée

Après identification des polluants potentiellement à risque liés à l'activité industrielle du site, l'approche méthodologique proposée se décompose en quatre étapes à répéter pour chaque polluant :

1. modélisation géostatistique des teneurs en polluants dans les sols,
2. estimation de l'incertitude sur la masse de polluant en place sous la forme d'intervalles de confiance,
3. estimation de l'incertitude sur la répartition spatiale de la source de pollution potentielle exprimée sous la forme de masses de polluants cumulées verticalement au-dessus de la zone saturée,
4. exploitation des résultats.

Une méthode géostatistique par simulation stochastique est utilisée pour simuler les teneurs en polluants (GeoSiPol 2005, Mathieu *et al.* 2014). Après une analyse exploratoire et statistique des données de teneurs qui vise à corriger les biais d'échantillonnage possibles (ex. échantillonnage préférentiel de sols pollués) et à établir des modèles statistiques qui décrivent les teneurs en polluants mesurées et leur variabilité spatiale (variogramme), cette méthode géostatistique permet de produire des images 3D réalistes des teneurs en polluants dans les sols. Contrairement aux méthodes d'estimation ou d'interpolation classiques (par krigeage, distance inverse ou autre), il ne s'agit pas de générer une carte d'estimation unique non représentative de la variabilité spatiale des données (carte dite lissée) mais un ensemble d'images 3D équiprobables qui sont réalistes du fait qu'elles reproduisent à la fois les données de teneur à leurs positions et leur variabilité spatiale telle qu'observée à partir des valeurs mesurées. L'incertitude locale sur la répartition spatiale des teneurs en polluants se traduit alors par des variations des teneurs d'une image 3D (simulation) à l'autre.

De chaque simulation il peut être déduit une masse de polluants en place, à l'intérieur du site d'étude ou par zone, et de l'ensemble des simulations en nombre suffisant des intervalles de confiance sur les masses de polluants en place pour en quantifier l'incertitude. Les masses en place renseignent ainsi sur le stock de polluants dans les sols.

Pour identifier la ou les sources de pollution, il a été choisi de s'intéresser à la masse de polluants cumulée verticalement au-dessus de la zone saturée (jusqu'à 4,5 m de profondeur). Les sols pollués sont évalués comme faisant partie d'une source de pollution potentielle si la masse de polluants cumulée verticalement est suffisamment importante. Des seuils de

dépassement supposés critiques permettent alors de juger de l'importance de la pollution. Des simulations 3D de la teneur en polluants, il est tiré des cartes 2D de la masse cumulée sur la verticale, soit autant de cartes 2D que de simulations 3D. Ces cartes 2D permettent d'estimer la carte de probabilité que la masse de polluants cumulée dépasse un seuil critique. La carte de probabilité ainsi obtenue renseigne sur l'incertitude quant à la présence ou non localement d'une source de pollution. Elle dépend du seuil de dépassement choisi et pour lequel on souhaite savoir si les données disponibles permettent de juger avec confiance de la présence ou non d'une source de pollution en tout point du domaine. Une probabilité faible indique peu de chances (ou risque) que les sols constituent localement une source de pollution pour le polluant considéré, tandis qu'une probabilité forte est à associer à une source de pollution avérée. Les sols incertains sont ceux où les probabilités prennent des valeurs intermédiaires qui ne permettent pas de connaître avec confiance l'état de pollution des sols.

Comme éléments d'aide à la décision, les cartes de probabilité servent finalement à classer les sols localement et avec confiance comme constituant ou non une source de pollution (probabilité de dépassement suffisamment forte ou faible) ou comme incertains (probabilité intermédiaire).

En utilisant un modèle géostatistique de la pollution des sols, l'approche proposée fournit ainsi une estimation des stocks de polluants en place et une délimitation des sources de pollution potentielles ainsi que les incertitudes respectives associées.

## 2. Application sur un cas d'étude

### 2.1 Présentation du cas d'étude

L'approche précédente a été appliquée à un site de l'industrie mécanique dans le cadre d'une reprise du site par un nouvel industriel. Ce site de moins d'un hectare contient deux ateliers de production et des zones de stockage (figure 1.a). Les données de l'étude proviennent d'une campagne de 38 sondages antérieure à l'étude (figure 1). Les sondages sont répartis dans les zones d'atelier et autour des bâtiments, pas dans la zone de stockage qu'il n'est pas possible de forer. La profondeur des sondages varie de 1 à 6 m, tous les sondages n'ayant pas pu atteindre la nappe située à environ 4.5 m de profondeur du fait de difficultés d'accès ou de forage. Les sondages révèlent trois unités lithologiques composées de remblais pour la première, de sables, argiles et calcaires pour la seconde, et de marnes argileuses pour la troisième. Les polluants mis à jour sur le site sont le chrome total et particulièrement le chrome VI plus à risque pour la santé et sur lequel a porté l'étude. Ce polluant est présent dans toutes les lithologies qu'il n'a pas été nécessaire de différencier pour construire le modèle géostatistique de la teneur en chrome VI dans les sols.

## 2.2 Résultats

### 2.2.1 Simulation des teneurs en polluants et visualisation 3D

Au total, 200 simulations de teneurs ponctuelles (à l'échelle des échantillons de sols) ont été générées pour le chrome VI. La figure 2 montre un exemple de deux simulations des teneurs en chrome VI selon trois mêmes plans de coupe. D'une simulation à l'autre, la variabilité des teneurs traduit l'incertitude locale sur les teneurs, l'incertitude étant d'autant plus grande que les teneurs simulées sont éloignées des sondages.

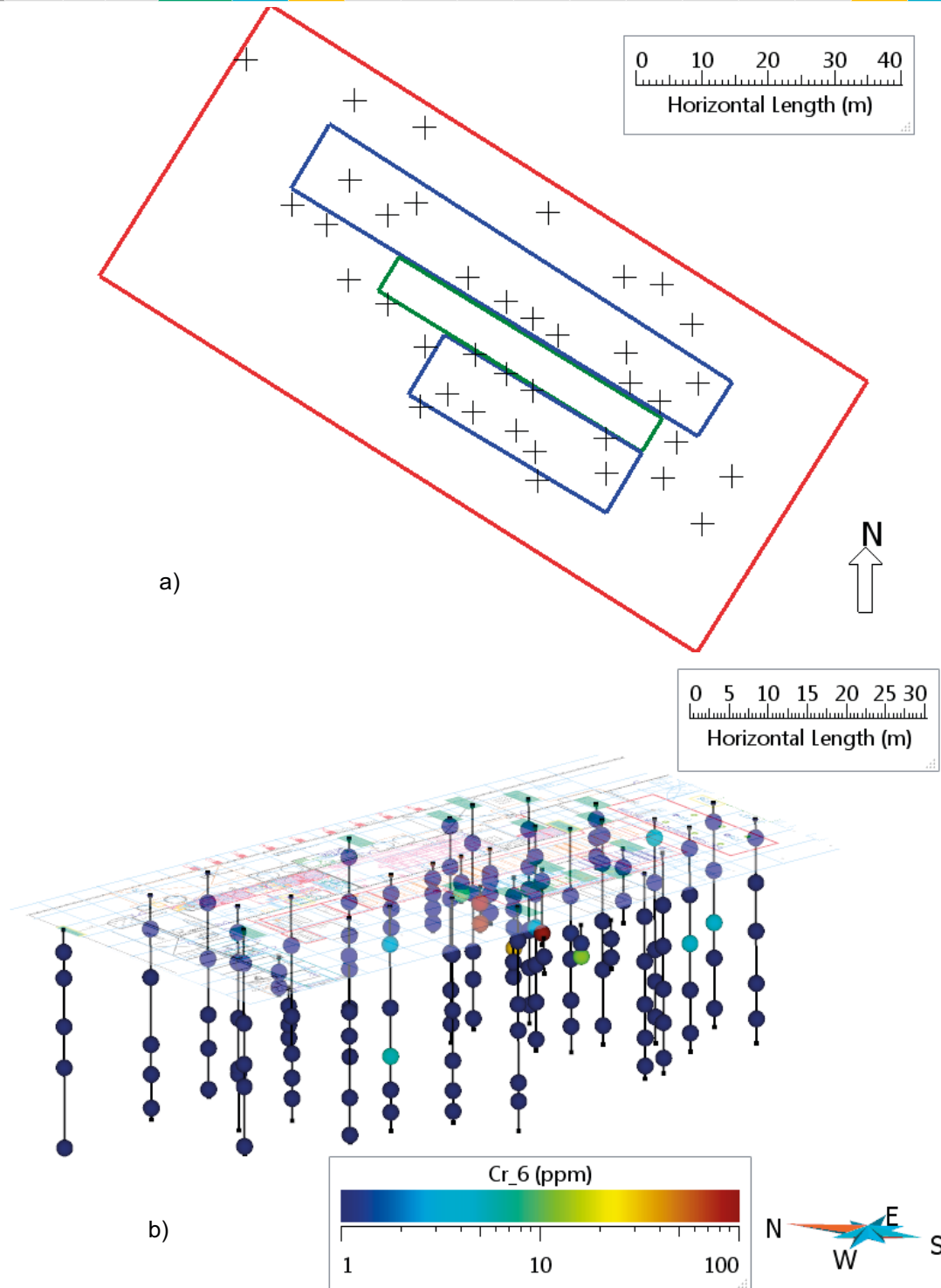
Des visualisations 3D de la pollution des sols peuvent être obtenues du modèle géostatistique pour comprendre la répartition de la pollution dans les sols et identifier des zones potentiellement polluées. Compte tenu de l'incertitude spatiale sur les teneurs en polluants, les sols potentiellement pollués sont délimités en ne prenant en compte que ceux qui ont une probabilité suffisamment grande (80 % de chances ou plus) d'avoir une teneur en chrome VI supérieure à un seuil critique donné. Le calcul est répété pour différents seuils de teneur en chrome VI, l'incertitude dépendant du seuil de teneur choisi. La figure 3 montre les enveloppes qui délimitent les sols très certainement pollués pour des teneurs supérieures à 2 ppm (a) et 5 ppm (b). Il en ressort une extension latérale similaire pour les deux enveloppes et des sols pollués à toutes les profondeurs depuis la surface ou presque jusqu'à la nappe. Les différences entre les deux enveloppes, aux profondeurs les plus grandes (> 2 m), s'expliquent par une incertitude plus grande quant au dépassement du seuil le plus élevé (5 ppm) aux endroits où les sondages sont peu profonds. Ce sont ces résultats qui ont permis de conclure que les sources de pollution possibles des sols pouvaient être plus facilement et utilement délimitées en s'intéressant à la masse de polluant cumulée verticalement au-dessus de la nappe.

### 2.2.2 Masses en place déduites des simulations géostatistiques

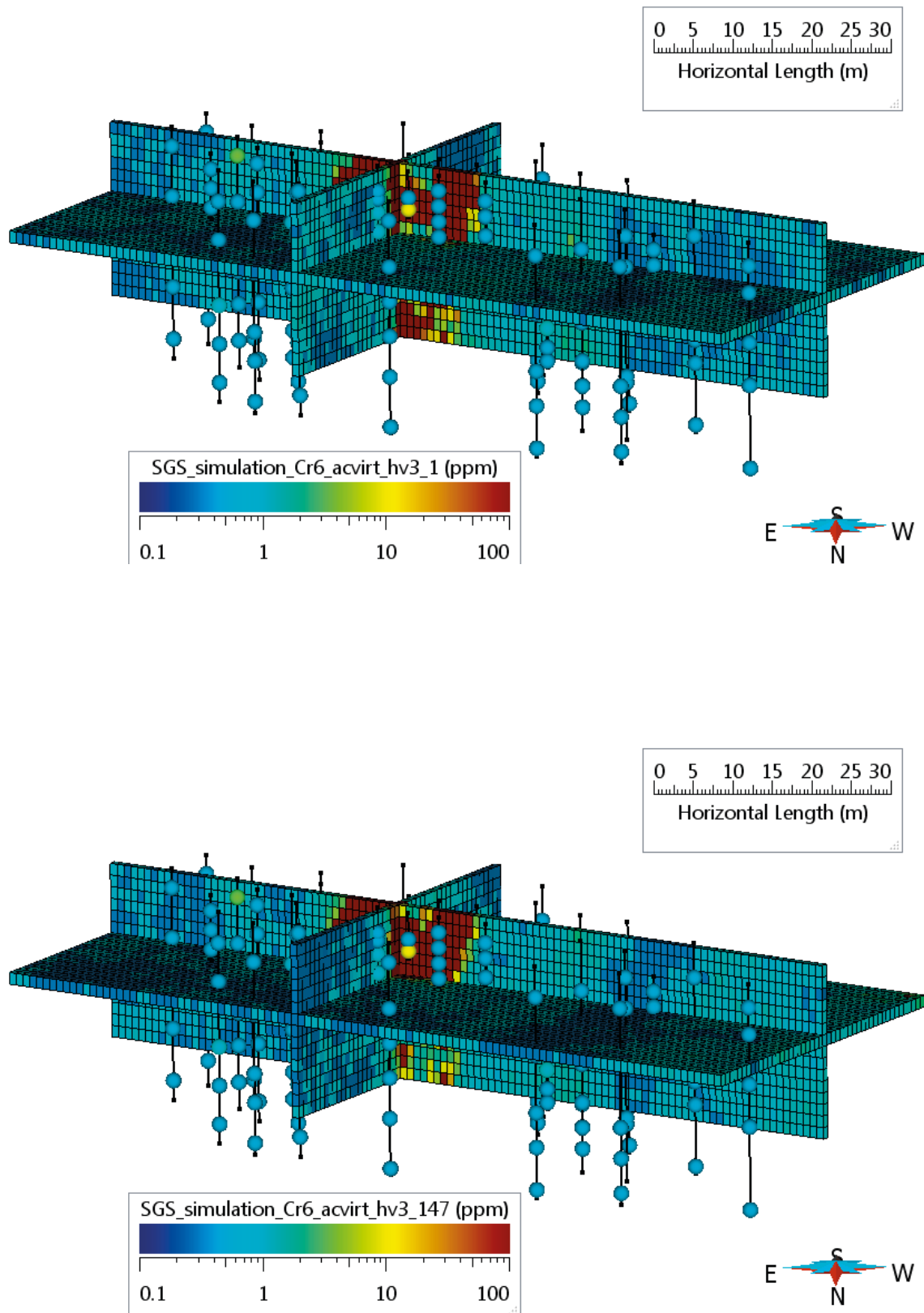
La figure 4 fournit l'histogramme de la masse de chrome VI en place déduite des 200 simulations géostatistiques des teneurs en chrome VI (histogramme des 200 valeurs de masses en place calculées sur les 200 simulations de la teneur en chrome VI). Le tableau 1 en fournit le résumé statistique. En complément, en vue d'une dépollution possible du site avant cession, il a été estimé à partir des simulations le volume des sols les plus pollués qui contiennent 80 % de la masse en place de chrome VI. Le tableau 1 en fournit également le résumé statistique.

**Tableau I. Résumés statistiques de la masse de chrome VI en place et du volume des sols les plus pollués correspondant à 80 % de la masse en place. Les intervalles de confiance à 95, 90 et 80 % de chances sont indiqués respectivement en vert, bleu et orange.**

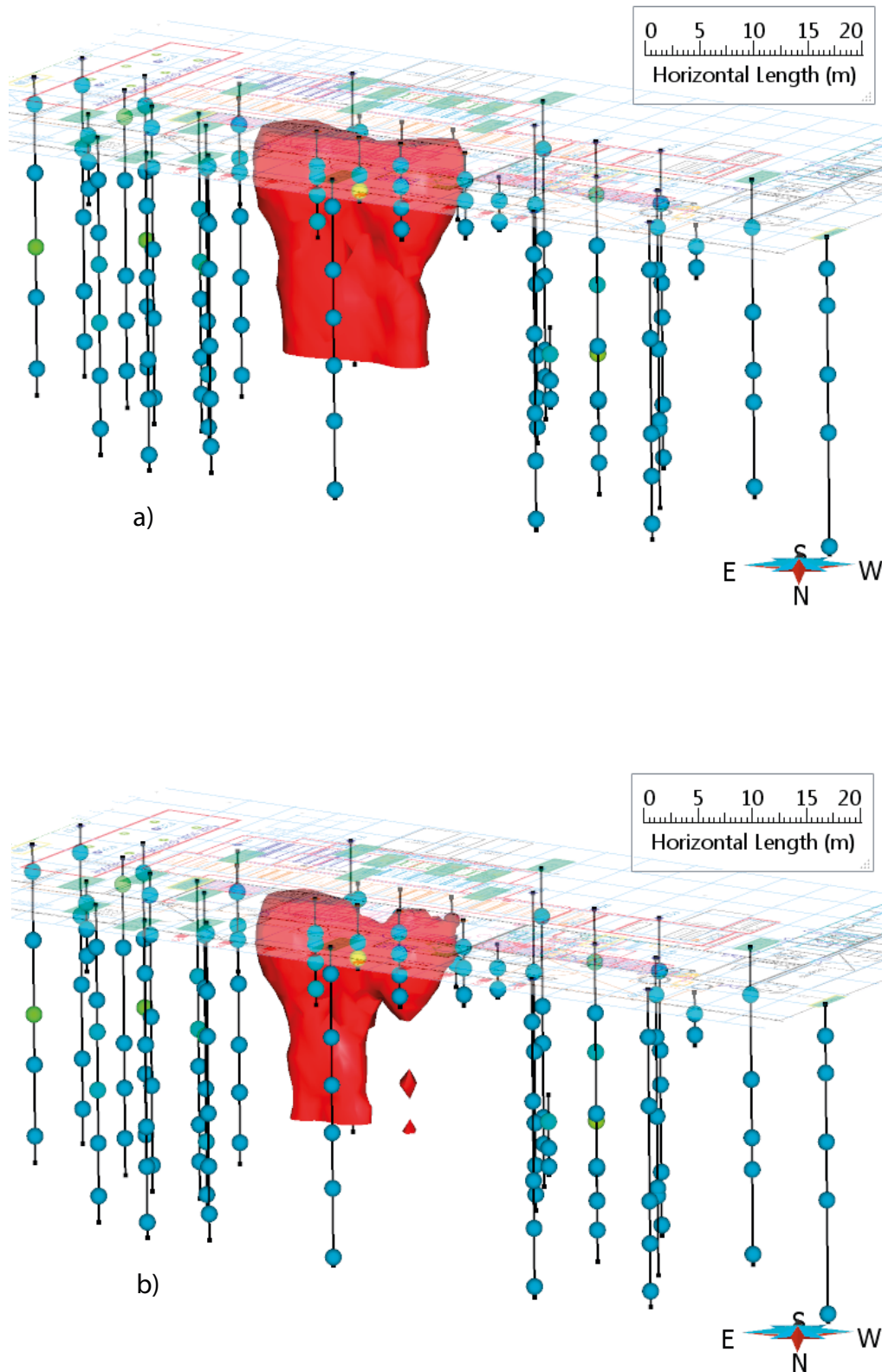
Chrome VI	Moy	$\Sigma$	Min	Q02.5	Q05	Q10	Q20	Q25	Q30	Q40	Q50	Q60	Q70	Q75	Q80	Q90	Q95	Q97.5	Max
Masse en place (kg)	224	64	108	135	140	156	171	178	187	196	210	228	247	256	270	305	349	390	442
Volume de sols pollués (m <sup>3</sup> )	252	70	129	154	161	177	193	202	211	223	237	256	278	289	303	341	388	434	493



**Figure 1. a) Vue de dessus du site. En rouge : limite du site ; en bleu : limites des deux ateliers de production et en vert : limite de la zone de stockage. Les sondages sont représentés par des croix. b) Vue de 3/4 du site présentant les sondages et les teneurs mesurées en chrome VI. Unité : ppm en échelle log10. Distorsion de l'axe vertical par un facteur 3.**



**Figure 2. Vues 3D de deux simulations des teneurs en chrome VI selon trois plans de coupe. Les sondages affichés sont ceux d'où proviennent les données de teneur utilisées pour conditionner les simulations. Unité : ppm en échelle log10. Distorsion de l'axe vertical par un facteur 5.**



**Figure 3. Zones à risque correspondant à 80 % de chances ou plus d'avoir des teneurs en chrome VI supérieures à 2 ppm (a) et 5 ppm (b). Distorsion de l'axe vertical par un facteur 5.**

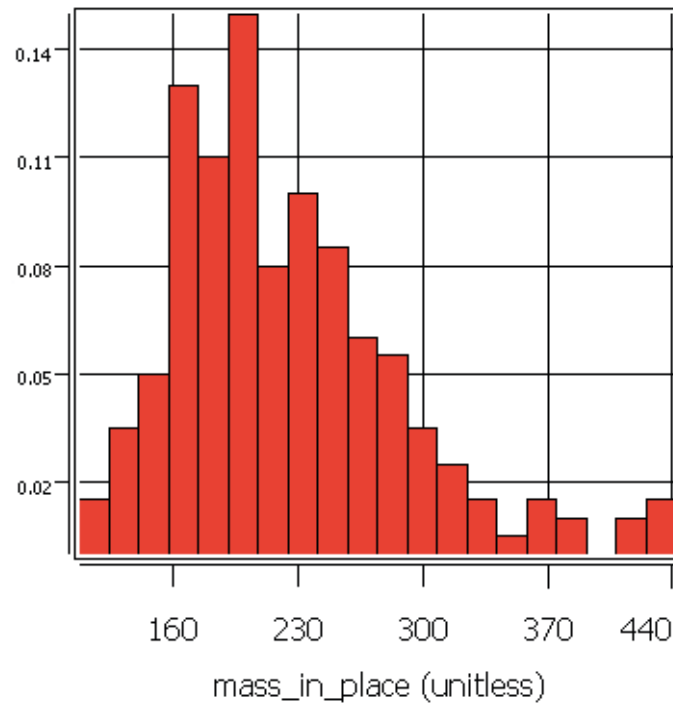


Figure 4. Histogramme des masses de chrome VI en place simulées. Unité : kg.

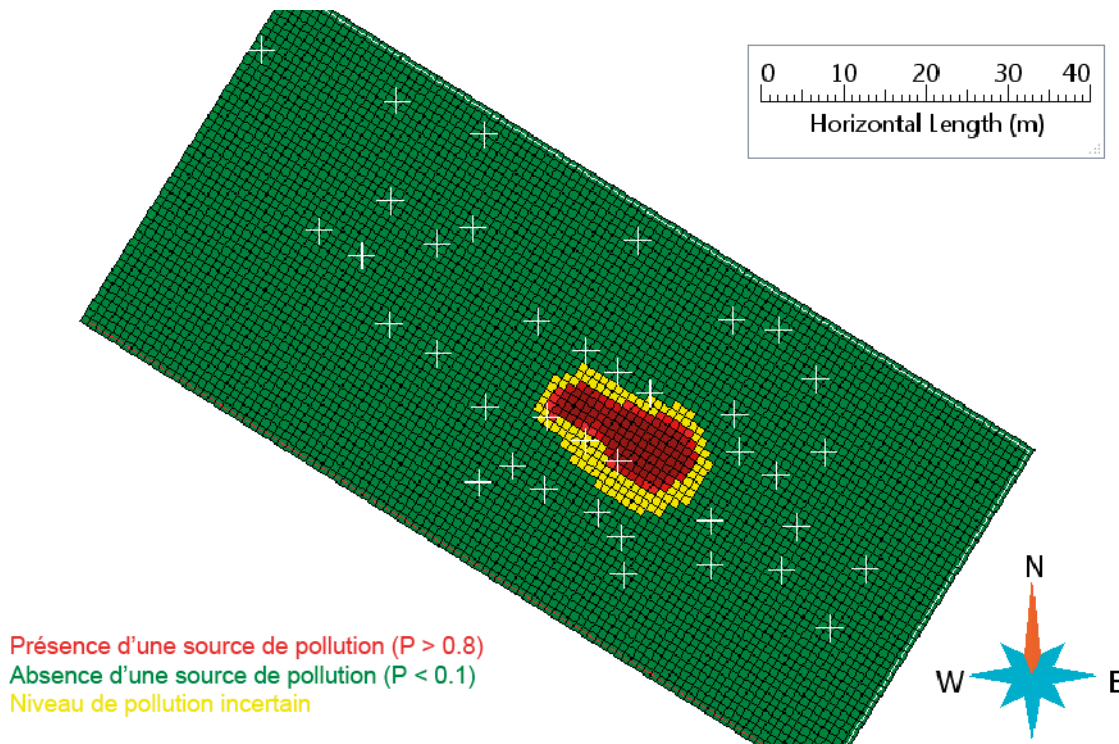


Figure 5. Carte de classification des sols en tant que source de pollution possible en chrome VI pour une masse de polluant cumulée dépassant 0.2 kg au-dessus de la zone saturée.

### 2.2.3 Classification des sols par rapport à la présence d'une source de pollution en chrome VI

Plusieurs seuils de dépassement de la masse de chrome VI cumulée verticalement au-dessus la zone saturée (profon-

deur de 4.5 m) ont été testés pour juger de la présence possible de sources de pollution et de l'incertitude sur la délimitation de ces sources. La figure 5 présente la carte 2D de classification des sols correspondant à un seuil de 0.2 kg.

Les sols sont classés avec confiance comme constituant une source de pollution si la probabilité de dépassement est supérieure à 0.8 et comme en-dehors d'une source de pollution si elle est inférieure à 0.1. Si la probabilité est intermédiaire entre 0.1 et 0.8, la présence ou non d'une source de pollution ne peut pas être déterminée avec suffisamment de confiance. Si nécessaire, des données complémentaires peuvent être recommandées dont l'emplacement peut être déterminé de façon à lever l'incertitude avec un minimum de sondages. Cette carte permet de juger de l'incertitude sur l'extension de la source de pollution en fonction du seuil de masse cumulée qui détermine le niveau de pollution considéré, ici 0.2 kg. Comme attendu, il apparaît sur la figure 5 que la zone incertaine (en jaune) se situe entre les sols classés avec confiance comme constituant une source de pollution (en rouge) et ceux classés avec confiance comme étant en dehors (en vert). La faible étendue de la zone incertaine ne justifie pas davantage d'investigations.

## Conclusion

Cette étude a permis de mettre en œuvre une approche géostatistique pour répondre aux besoins de production d'un état zéro de la qualité des sols dans le cadre d'une cession de site industriel. Il s'agit pour l'industriel détenteur

actuel du site de dégager sa responsabilité par rapport à des pollutions futures et pour l'industriel qui se porte acquéreur de juger de la nécessité ou non d'une dépollution du site avant ou après reprise et du coût financier associé.

L'avantage premier de la géostatistique est de fournir des estimations associées à une incertitude, que ce soit sur la masse de polluant en place que sur la délimitation de sources de pollution potentielles. En utilisant une méthode de simulation géostatistique des teneurs en polluant pour construire le modèle 3D de la pollution des sols, il est montré tous les résultats utiles qui peuvent être tirés des simulations pour juger de l'état zéro qui doit servir de référence.

## Références bibliographiques

GeoSiPol, (2005). Géostatistique appliquée aux sites et sols pollués. Manuel méthodologique et exemples d'application. 139p. [https://geosipol.org/wp-content/uploads/2013/02/GeoSiPol\\_Manuel\\_Methodologiquejuin06-2-2.pdf](https://geosipol.org/wp-content/uploads/2013/02/GeoSiPol_Manuel_Methodologiquejuin06-2-2.pdf)

Mathieu J.B., Kaskassian S., Garcia M.H., (2014). Apport de la géostatistique au diagnostic de sites et sols pollués : prolongement d'un cas d'étude de démonstration GeoSiPol. 3<sup>ème</sup> Rencontres nationales de la recherche sur les sites & sols pollués, 18 au 19 novembre 2014, Paris, France.