

### Résumé des travaux réalisés et des résultats obtenus

---

Les études de démonstration ont été réalisées selon l'état de l'art en géostatistique (voir Manuel Méthodologique GeoSiPol). Elles ont conduit à des conclusions propres à chacune et qui illustrent l'apport de la géostatistique, ses limites et les précautions à prendre quant à son application aux sites et sols pollués. Les travaux réalisés et les résultats obtenus pour chaque étude sont résumés ci-après.

#### 1. CAS D'ETUDE TOTAL FRANCE

Le site est un ancien dépôt d'hydrocarbures démantelé suite à la fin de son activité et ayant fait l'objet de plusieurs campagnes d'échantillonnage, concernant l'analyse des hydrocarbures dans les sols. L'Évaluation Détaillée des Risques (EDR) a été menée afin d'évaluer le niveau de risque résiduel lié à l'ancienne activité du dépôt, en fonction de l'usage futur envisagé sur le site et a fixé un seuil de dépollution global, vis à vis des hydrocarbures totaux (HCT), de 2500 ppm (sur matière sèche).

Enfin, la dépollution du site ayant eu lieu, il est possible aujourd'hui de comparer les volumes estimés par l'approche géostatistique aux volumes réels rencontrés sur le site lors de cette phase.

L'étude géostatistique avait pour objectifs la cartographie de la pollution moyenne en HCT sur le site et de la probabilité de dépassement du seuil de 2500 ppm ainsi que l'évaluation des volumes de terres contaminées et à excaver en vue d'un chiffrage du coût de la dépollution du site.

L'intérêt d'une telle approche est de baser l'évaluation des coûts liés aux volumes contaminés sur les données disponibles, en intégrant cependant l'incertitude liée à l'hétérogénéité spatiale de la contamination et à la reconnaissance uniquement parcellaire de celle-ci.

Les conclusions ont montré que la première étude géostatistique réalisée à maille fine d'1 m de côté était adaptée pour prévenir d'éventuels contrôles ponctuels, pour délimiter les zones polluées et pour conseiller la réalisation de nouveaux sondages dans les zones les plus incertaines. En revanche la maille d'estimation étant très différente de la maille retenue pour l'excavation, le calcul des volumes pollués n'est pas pertinent. En effet, en l'absence de connaissance de la maille retenue lors de l'excavation, aucune quantification des volumes ne peut être réalisée sans biais, l'estimation des volumes pollués au-delà d'un certain seuil dépendant du support d'estimation choisi.

Pour cela une deuxième étude a été réalisée. Intégrant de plus les nouveaux sondages réalisés à la suite de la première étude géostatistique, elle a montré la pertinence de la géostatistique pour l'estimation des volumes pollués. Le volume pollué réel de 13 171 m<sup>3</sup> est en effet proche de la valeur estimée comme étant la plus probable (12 059 m<sup>3</sup>), correspond au quantile 25% des valeurs estimées et est donc largement inclus dans l'intervalle de confiance à 90% construit à partir des estimations. Il est également important de noter que l'excavation ne s'est pas déroulée exactement à maille 15 m mais avec des irrégularités et des passes successives horizontales en bordure de zone contaminée. Verticalement, la maille utilisée est inconnue et probablement au minimum de 50 cm alors que l'estimation géostatistique de l'épaisseur est faite de manière beaucoup plus fine.

Après l'estimation du volume pollué, il est également nécessaire de calculer un volume qu'il conviendra d'excaver pour atteindre toute la pollution. En effet, en raison de la variabilité spatiale des teneurs et de l'incertitude liée à la profondeur réelle de la couche contaminée en HCT, il est recommandé de ne pas baser l'excavation sur l'estimation du volume pollué uniquement, en raison du risque important qu'il présente de laisser en place des sols contaminés.

En considérant le quantile 25% des estimations pour le volume pollué ainsi que le scénario le plus probable et le scénario sécuritaire (qui considère les quantiles 25% pour la profondeur du toit de la couche et 75% pour la base) pour la géométrie de la couche potentiellement contaminée, un encadrement du volume à excaver entre 17 750 m<sup>3</sup> et 31 239 m<sup>3</sup> est réalisé. Cet intervalle comprend le volume réel excavé de 22 348 m<sup>3</sup>.

Il est évident que procéder de la sorte conduira à l'excavation de volumes non négligeables de terres saines, qui pourraient éventuellement être triées en cours de dépollution. Prévoir la réhabilitation de

tels volumes permet cependant de s'affranchir du risque de laisser en place des terres contaminées et de beaucoup mieux prévoir les coûts de dépollution.

Enfin, la comparaison maille à maille entre la zone réellement excavée et les prédictions a été réalisée en superposant les cartes. Elle montre une très bonne concordance entre l'étude géostatistique et les zones réellement excavées, confirmant la qualité des résultats globaux précédents et donc la pertinence de l'approche géostatistique mise en œuvre sur ce site.

## 2. CAS D'ETUDE 1BIS ATTENA (BURGEAP)

Ce site de recherche n'a pas fait l'objet d'une dépollution avec excavation des sols. Par conséquent, les résultats de l'étude géostatistique n'ont pas pu être validés de façon classique en les confrontant à des volumes de sols pollués excavés. En rapport avec les travaux de recherche menés dans le cadre du projet ATTENA, d'autres objectifs d'étude tout aussi intéressants ont cependant pu être définis en s'intéressant à la délimitation de la « zone source » constituée des sols dont la somme des teneurs en PCE, TCE et DCE est suffisamment élevée pour qu'une phase organique y soit présente.

Pour cette étude de démonstration, trois modèles géostatistiques ont été générés. Ces modèles ont consisté à simuler conjointement les teneurs en PCE, TCE et DCE en exploitant progressivement les nombreuses données disponibles (287 échantillons de sols analysés).

1. Modèle géostatistique de base. Le jeu de données complet a été décomposé en deux sous-ensembles de 49 et 238 échantillons, le premier devant servir à construire le modèle géostatistique de la pollution des sols, le second à vérifier les bonnes prédictions du modèle. Le choix des données du modèle a été effectué par Burgeap en se déterminant par rapport à des conditions d'étude habituelles sur le nombre de données et leur répartition (en particulier verticale).
2. Modèle géostatistique amélioré. Une première amélioration a porté sur les modèles de distribution et variographiques (distributions, corrélations entre composants et variogrammes). Le jeu de données complet (287 échantillons) a ainsi été utilisé pour estimer plus justement ces modèles et étudier l'impact de cette amélioration sur la simulation géostatistique des teneurs en utilisant toujours le jeu de données restreint (49 échantillons) pour conditionner les simulations. Comme précédemment, les 238 données de validation, non prises en compte dans les simulations, ont servi à analyser les prédictions du modèle géostatistique amélioré.
3. Modèle géostatistique complet. En s'appuyant sur les modèles statistiques améliorés établis précédemment, les teneurs ont été simulées à nouveau mais en les conditionnant sur le jeu de données complet (287 données). Le modèle géostatistique ainsi obtenu montre comment les 238 données nouvelles contribuent à réduire amplement l'incertitude spatiale. Ce modèle peut être considéré comme un modèle de référence de la zone source par rapport aux modèles précédents.
4. Ce cas d'étude présente deux particularités intéressantes. D'une part, il nécessite de simuler conjointement les trois composants, qui sont corrélés entre eux, pour modéliser la zone source. D'autre part, il permet d'aborder le problème des données sous les limites de détection analytiques, qui représentent de 15 à 50% des données selon les composants et dont la prise en compte dans les modèles géostatistiques nécessite des précautions particulières.

En tant que démonstration de l'application de la géostatistique aux sites et sols pollués, cette étude apporte des résultats sur les aspects suivants.

- Pertinence de la géostatistique pour estimer le volume et la localisation d'une zone source ou plus généralement de sols pollués (teneurs supérieures à un seuil défini de manière indépendante).
- Validation des prédictions des modèles géostatistiques et interprétation des écarts.
- Importance des analyses statistiques et variographiques sur la qualité des modèles géostatistiques.
- Importance des données complémentaires pour réduire les incertitudes spatiales.
- Complexité de ces études et façon de les aborder.

### 3. CAS D'ETUDE T (ARCELORMITTAL REAL ESTATE)

L'ancienne cokerie du site T a fait l'objet de plusieurs campagnes d'échantillonnage dans le but de délimiter et quantifier la contamination du sol. La présente étude reprend les données de deux campagnes, LECES et GEOSTOCK. L'examen des données met en évidence une difficulté majeure pour l'étude de la pollution : alors que le sol est extrêmement hétérogène, aucune information n'a été transmise concernant les méthodes d'échantillonnage et le volume des échantillons prélevés. Or, dans un milieu hétérogène comme celui-ci, ces informations sont fondamentales car de nombreuses décisions méthodologiques en dépendent.

En l'absence d'informations précises sur l'échantillonnage, nous nous sommes attachés à présenter à chaque étape les divers choix qui s'offraient à nous, et nous avons investigué les conséquences de chacun d'eux.

In fine, nous avons proposé une méthode de cartographie des contaminations en HAP, plomb et zinc qui regroupe tous les échantillons, sans que nous sachions si les hypothèses sous-jacentes étaient vérifiées. L'analyse de la carte associée d'écart-type de krigeage montre que la moyenne de cet écart-type sur toute l'épaisseur étudiée est toujours supérieure au seuil de contamination. Les cartes de contamination ponctuelle ne permettent donc pas de délimiter les zones contaminées, sauf à accepter un risque élevé de laisser de la contamination en place.

Pour l'estimation de la concentration sur des mailles de 10m x 10m x 3m, le calcul de l'intervalle de confiance conventionnel permet de séparer des zones très probablement contaminées de zones où la contamination est possible mais non certaine. Il n'y a pas de zone très probablement non contaminée. Mais la mauvaise qualité des données et de leur modélisation ne nous permet d'avoir qu'une confiance limitée dans des résultats.

L'intérêt de ce site pour une étude de démonstration n'est donc pas de montrer les méthodes géostatistiques à utiliser, mais de permettre d'expliquer en quoi les informations sur les méthodes d'échantillonnage sont fondamentales pour une étude de géostatistique de qualité.

Les données supplémentaires que nous espérions pour valider la méthodologie nous ont été transmises tardivement. La mauvaise qualité de la modélisation étant déjà connue, les résultats d'une validation, qu'elle soit favorable ou non, ne peuvent pas être significatifs et cette validation n'a pas été effectuée.