

Retour d'expérience critique sur l'utilisation de méthodes géostatistiques pour la caractérisation des sites et sols pollués



**RETOUR D'EXPERIENCE CRITIQUE
SUR L'UTILISATION DE METHODES GEOSTATISTIQUES
POUR LA CARACTERISATION DES SITES ET SOLS POLLUES**

RAPPORT FINAL

février 2013

N. JEANNEE, C. FAUCHEUX – GEOVARIANCES
H. DEMOUGEOT-RENARD – eOde
S. BELBEZE – ANTEA



Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
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
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

© RECORD, 2014

RESUME

La géostatistique fait aujourd'hui partie de la palette des outils à disposition des professionnels pour caractériser les sites et sols pollués. Elle fournit un cadre méthodologique rigoureux permettant de répondre à divers objectifs métiers : optimisation de stratégies d'échantillonnage, cartographie de la contamination, évaluation de la compatibilité des terres avec les usages futurs envisagés lors de la réhabilitation, intégration de plusieurs types de mesures lorsque celles-ci sont disponibles.

Aujourd'hui, sa valeur ajoutée opérationnelle ainsi que les conditions de sa mise en œuvre restent cependant encore délicates à apprécier. L'objet de l'étude est de remédier à cela en réalisant un bilan sur 15 ans de l'application de la géostatistique aux sites et sols pollués, que ce soit au niveau national ou international. Une attention particulière est portée à la complémentarité de cette méthodologie avec d'autres approches, telles que les mesures géophysiques ou mesures sur site.

Ce retour d'expérience, qui se veut critique et objectif, a été réalisé au travers d'une étude aux axes multiples : présentation de l'état de l'art concernant ces méthodes et des conditions d'intégration de mesures indirectes telles que la géophysique, synthèse bibliographique des travaux publiés dans différents pays, panorama de l'offre de formations et de logiciels existants, position des différentes autorités sur le sujet, enquête auprès d'acteurs impliqués dans la caractérisation de sites pollués qui ont été confrontés à ce type d'approches, rédaction de fiches de cas.

L'ensemble des éléments acquis permet de dresser un bilan de l'utilisation actuelle de la géostatistique pour la caractérisation de sites et sols pollués. Les éléments positifs ont été identifiés tout comme les freins potentiels à son application plus courante. Des recommandations sont ainsi fournies afin d'entourer de telles études de toutes les garanties de réussite, mais également d'améliorer leur intégration opérationnelle dans les projets de dépollution de sites. Des axes de recherche et développement qui permettraient de répondre à des problèmes rencontrés par les professionnels sont également suggérés.

MOTS CLES géostatistique, krigeage, caractérisation, sites et sols pollués, variogramme, simulations, multivariable, incertitudes, risque, communication, aide à la décision, géophysique, mesures sur site.

SUMMARY

Geostatistics is now recognized as one of the relevant solutions for the characterization of contaminated sites. It provides a sound methodological framework that can meet several objectives: sampling optimization, contamination mapping, assessment of land use compatibility regarding future site, integration of several kinds of measurements when available.

However, its added value and the condition necessary to its successful application are still difficult to assess. The main purpose of this project is therefore to draw up a 15 years report of the use of geostatistics for contaminated sites, both at national and international levels. A particular focus is made on the complementarity of this methodology with other approaches such as geophysical or on-site measurements.

This critical and objective feedback includes several themes: state of the art regarding these methods and the integration of indirect measurements such as geophysics, international literature review, actual training and software offer, position of regulatory authorities, survey amongst actors involved in the characterization of contaminated sites who faced this kind of approach, real case illustrations.

These elements help in assessing the current use of geostatistics for characterizing contaminated sites. Benefits have been identified as well as potential barriers for a more common application. Recommendations are also provided to ensure the success of geostatistical projects and improve their operational integration during site remediation. Finally, research and development themes which could answer the encountered problems are suggested.

KEY WORDS Geostatistics, kriging, characterization, contaminated sites, variogram, simulations, multivariate, uncertainties, risk, communication, decision-making tool, geophysics, on site measurements.

SOMMAIRE

1.	Introduction.....	9
1.1.	Objectifs	9
1.2.	Travail réalisé / Moyens mis en œuvre	9
1.3.	Cadre et limites de l'étude.....	10
1.4.	Organisation du rapport	10
1.5.	Remerciements	10
2.	Les données valorisables dans un modèle.....	11
2.1.	Les données directes	11
2.2.	Les données indirectes	11
3.	Les méthodes géostatistiques et leur application aux SSP	13
3.1.	Bref historique du développement de la géostatistique	13
3.2.	Principaux concepts et méthodes géostatistiques	13
3.3.	Quels outils pour quels objectifs ?	21
4.	L'intégration des données indirectes dans un modèle.....	25
4.1.	Les conditions à remplir pour une intégration utile des données indirectes	25
4.2.	L'étude des relations statistiques entre données	26
4.3.	L'étude et la modélisation des relations spatiales entre données	27
4.4.	Les méthodes géostatistiques pour valoriser les données indirectes.....	28
4.5.	L'application de la géostatistique aux mesures géophysiques	32
4.6.	L'application de la géostatistique aux mesures sur site.....	42
4.7.	En résumé	50
5.	Le contexte de mise en œuvre actuel.....	53
5.1.	Les outils (logiciels)	53
5.2.	Les formations.....	57
5.3.	La position des autorités	58
5.4.	La recherche dans le domaine.....	61
6.	Les dernières innovations scientifiques	68
6.1.	Développements méthodologiques.....	68
6.2.	Combinaison de la géostatistique à d'autres modèles.....	72
6.3.	Comparaison de la géostatistique à d'autres méthodes d'estimation probabiliste	73
6.4.	Optimisation des schémas d'échantillonnage	73
6.5.	Tests de validité de la géostatistique	77
6.6.	La géostatistique pour évaluer les flux massiques de polluants	79
6.7.	Synthèse	80
7.	L'enquête auprès des professionnels	81
7.1.	Présentation de l'enquête	81
7.2.	Synthèse des résultats de l'enquête	81
8.	Les fiches de cas.....	90
8.1.	Principe	90
8.2.	Site de Dourges.....	91
8.3.	Site de Sarcelles	94
8.4.	Site de la Pila	98
8.5.	Site de Fontenay	102
9.	Analyse critique de la situation actuelle, perspectives et axes de développement possibles	104
9.1.	Bilan de l'utilisation actuelle de la géostatistique	104
9.2.	Leçons à tirer et recommandations.....	106
9.3.	Décider de la pertinence d'une étude géostatistique	108
9.4.	Perspectives.....	111
10.	Conclusion.....	114
11.	Bibliographie.....	115
	Annexe A : Questionnaires envoyés aux professionnels	122

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Quelle estimation en un point à partir des données voisines ? Et quelle incertitude associée ? <i>Dans les deux cas présentés, l'estimation pourra être la même ; en revanche l'incertitude associée sera différente car la continuité spatiale n'est pas identique.</i>	13
Figure 2 : Plan de position de données associé à une échelle de couleurs.....	14
Figure 3 : Histogramme et statistiques typiques de données de pollution.	14
Figure 4 : Plan de position et nuée variographique avec mise en évidence de deux paires de points.	15
Figure 5 : Construction du variogramme expérimental à partir de la nuée variographique.....	15
Figure 6 : Variogramme expérimental (points) et modélisation de la structure spatiale (trait épais).	16
Figure 7 : Cartographie par krigeage et écart-type d'erreur de krigeage associé.....	17
Figure 8 : Post-traitement des surfaces dont les concentrations en polluant dépassent un seuil donné (histogramme cumulé inverse). Indication de quelques quantiles particuliers.....	18
Figure 9 : Carte de probabilité de dépassement de seuil.....	19
Figure 10 : L'effet de support : variation du volume excédant un seuil en fonction de la maille considérée.	20
Figure 11 : Premiers et deuxièmes composants obtenus par Analyse en Composantes Principales (ACP) des paramètres hydrochimiques et microbiologiques de lixiviats d'une décharge (Mouser et al., 2005).....	26
Figure 12 : Exemple de nuage de corrélation entre deux variables ($\rho = 0.96$).	26
Figure 13 : Analyse des correspondances sur les indices sur la nature du sol d'une ancienne cokerie (a) et nuage de corrélation entre le premier facteur et la concentration en benzo(a)pyrène (Jeanne, 2001).....	27
Figure 14 : Variogrammes expérimentaux (en rouge, avec nombre de paires de points) simples et croisés des activités massiques en uranium et des mesures surfaciques du rayonnement $\beta\gamma$ (après transformation gaussienne) du béton d'anciennes installations nucléaires et modèles ajustés (bleu) (Desnoyers, 2010).....	28
Figure 15 : Comparaison des cartes obtenues par krigeage et cokrigeage des activités massiques en uranium. (a) estimation par krigeage (haut) et largeur de l'intervalle de confiance à 95% associé à l'estimation (bas). (b) estimation par cokrigeage (haut) avec des mesures surfaciques de rayonnement $\beta\gamma$ pour information secondaire, et largeur de l'intervalle de confiance à 95% associé (bas) (Desnoyers, 2010).....	29
Figure 16 : Comparaison du krigeage et du cokrigeage de concentrations en Bap avec la somme des concentrations Bbf + Bkf ou bien la présence/absence de goudron pour variable auxiliaire. (a) localisation des données d'estimation (rouge) et de validation (vert). (b) erreurs quadratiques moyennes entre données de validation et valeurs estimées. (c) nuages de corrélation entre données de validation et valeurs estimées par krigeage ou cokrigeage avec présence/absence de goudron pour variable auxiliaire. (d) nuages de corrélation entre données de validation et valeurs estimées par krigeage ou cokrigeage avec Bbf+Bkf pour variable auxiliaire (Jeanne, 2001).....	30
Figure 17 : Fence diagram showing Red NAPL blobs and 3D isosurface, ENID site, 2003 campaign, Innovative High Resolution Electrical Resistivity Imaging (ERI), McDonald & Halihan (2003).....	33
Figure 18 : Red DNAPL 2D blobs on a site trench. "At the time the image was taken, wells were "clean" for 2 years", Innovative High Resolution Electrical Resistivity Imaging (ERI), McDonald & Halihan (2003).	33
Figure 19 : Cartographie géomagnétique du site Bostik de Ribécourt et forages validant la méthode (EOST & Antea Group, 2006).....	34

Figure 20 : Délimitation du périmètre d'une ancienne décharge par mesures électromagnétiques EM31 (Dondaine et Belbèze, 2004).....	36
Figure 21 : Mesure des anomalies de conductivité au voisinage de lagunes indiquant les sols impactés et voies de fuite (Kuosmanen, 2002).	36
Figure 22 : Friche industrielle de Mortagne du Nord (Guérin et al, 2002) : carte de conductivité électrique apparente EM31 avec une zone bleu/vert relativement conductrice qui correspond à une zone baignée par de l'eau très minéralisée et une zone en rouge/marron relativement résistante (alluvion ou zone moins minéralisée).	37
Figure 23 : Friche industrielle de Mortagne du Nord : corrélation entre matériaux de la friche et réponse EM (Guérin et al, 2002).	37
Figure 24 : Cartes de krigeage d'indicatrices pour (a) Zone non saturée, (b) Zone saturée, sable fin et moyen, (c) Zone saturée, Sables et graviers. Characterisation of an unregulated landfill using Surface-Based Geophysics (Woldt et al, 1998).....	38
Figure 25 : Détermination d'un profil de pollution par hydrocarbures par examen de l'atténuation des ondes radar (Annan, 2001).....	39
Figure 26 : Profil radar au droit d'une zone ayant abrité des cuves à hydrocarbures (Dondaine & Delcausse, 2003).	39
Figure 27 : Etude de la profondeur d'un substratum par sismique réfraction, 2006, IMG Ingénierie. 40	
Figure 28 : Exemple de dispositif de prélèvement de gaz du sol et de mesure des COV par un détecteur par photo-ionisation (PID) (Delcausse & Belbeze, 2003).	43
Figure 29 : Exemples d'analyseurs de gaz disponibles dans le commerce (MultiRAE et Dräger Multiwarn).....	43
Figure 30 : Exemple de dispositif de mesures de gaz du sol et de cartographie des teneurs mesurées en cyanure d'hydrogène à l'aide de l'outil logiciel FIELDS (Bing Canar, 2008).	44
Figure 31 : Warren recycling, H2S emission measurement and mapping (Durno, 2008).....	44
Figure 32 : Cartographie par krigeage des valeurs PID des sols d'une zone d'aménagement concerté (Delcausse & Belbeze, 2003).	45
Figure 33 : Schéma de fonctionnement de la sonde MIP et photographies du système de forage Geoprobe, de la sonde MIP et de son insertion.....	46
Figure 34 : Exemples de profils verticaux de valeurs mesurées à l'aide d'une sonde MIP.....	46
Figure 35 : Exemple de cartographie 2D (section verticale) établie par interpolation de diagraphies MIP ERM (Fiacco, 2009).....	47
Figure 36 : Principe de la spectrométrie à fluorescence de rayons X et exemples d'appareils XRF portables.	47
Figure 37 : Exemple de cartographie par krigeage des teneurs en plomb mesurées par XRF (Bing Canar, 2008).	48
Figure 38 : Exemple de cartographie par krigeage de mesures hélicoptères sur l'incident nucléaire de Fukushima - données US DOE (Chambers, 2011).....	49
Figure 39 : Exemple de cartographie par krigeage de mesures radioactives sur la décharge IEL, Uniontown, Ohio (NARM, 2008).	49
Figure 40 : Le véhicule VEgAS d'acquisition des données surfaciques de radioactivité.	50
Figure 41 : Jacobsville Neighborhood XRF Phase 1 Collection (Sleboda Braun, 2005).	50
Figure 42 : Plan d'échantillonnage et cartographie de la probabilité de dépassement d'un seuil de contamination (Geovariances, 2011).	51
Figure 43 : Nombres d'articles « géostatistique et sites pollués » par périodes : valeurs absolues (a) et valeurs relatives rapportées au nombre d'articles « sites pollués » publiés sur les mêmes périodes. 62	

Figure 44 : Exemple de distribution dissymétrique observée sur des données de pollution de sol industriel (gauche) et distribution obtenue après transformation (droite).....	69
Figure 45 : Nuage de corrélation entre les concentrations en arsenic estimées par krigeage de rang (abscisse) et krigeage lognormal (ordonnée) (Singh & Ananda, 2002).....	69
Figure 46 : Krigeage disjonctif de mesures de radiations nucléaires avec transformation préalable des données. Croix vertes : valeurs plus faibles dans le modèle multigaussien. Carrés rouges : valeurs plus élevées (Desnoyers et al., 2011).	70
Figure 47 : Illustration de la variabilité des supports des données de site pollué : échantillons représentatifs de hauteurs allant de 1 à 5 m (gauche), sans corrélation visible avec les concentrations mesurées en benzo(a)pyrène (droite) (H. Demougeot-Renard, 2002).	70
Figure 48 : Exemple de schéma d'échantillonnage stratifié systématique aléatoire.	74
Figure 49 : Prévisions des volumes (droite) et des coûts (droite) en fonction du nombre d'échantillons supplémentaires (N_7) collectés sur un site pollué déjà investigué (cas d'une ancienne fonderie, pollution des sols au Pb). Ve : volume à dépolluer, Vu : volume incertain, Ci : coût d'investigation, Ce : coût de dépollution, Cu : coût incertain (H. Demougeot-Renard, de Fouquet, & Renard, 2004).	75
Figure 50 : Les étapes de la démarche REPERAGE de couplage de méthodes géostatistiques et de mesures sur site (H Demougeot-Renard et al., 2008).	77
Figure 51 : Rôles des organismes ayant répondu à l'enquête (réponse multiple possible).	82
Figure 52 : Nombre d'études rencontrées ou réalisées pour lesquelles la géostatistique a été utilisée.	82
Figure 53 : Contexte d'utilisation de la géostatistique par les différents acteurs.	83
Figure 54 : Bilan global de l'utilisation de la géostatistique au cours de ces études.	84
Figure 55 : Identification des freins à une utilisation plus courante de la géostatistique.	85
Figure 56 : Traitement des incertitudes associées aux résultats analytiques.	86
Figure 57 : Polluants rencontrés sur les différents sites présentés par les participants à l'enquête. ..	87
Figure 58 : Objectifs de l'utilisation de la géostatistique sur les différents sites.	88
Figure 59 : Problèmes rencontrés lors de l'utilisation de la géostatistique sur ces sites.	89
Figure 60 : Sondages réalisés sur le site de Dourges.....	92
Figure 61 : Estimation de la teneur en HAP dans les sols superficiels (0-1 m) et incertitudes associées.	92
Figure 62 : Contamination en HAP des terres superficielles (0-1 m) en considérant le seuil de 50 mg/kg. À gauche : Carte de probabilité de dépassement. À droite : Surfaces probables contaminées.	93
Figure 63 : Localisation du site (extrait Géoportail).	94
Figure 64 : Plan du site, implantation des sondages et maillage d'excavation retenu.	95
Figure 65 : Gauche : Histogramme cumulé inverse des volumes contaminés en HAP, naphthalène ou benzo(a)pyrène (indication des quantiles 5, 50 et 95%), droite : cartographie de la probabilité de contamination pour la couche 53-54 m.	95
Figure 66 : Superposition des résultats d'une simulation en HAP (logarithme) à maille horizontale 1 m (blanc) et 10 m (hachures). Seules les valeurs au-delà du seuil de contamination sont représentées : en bleu, envoi en CET2, en vert, envoi en CET1 et en rouge, incinération.	96
Figure 67 : Photographie aérienne du site (© Michel Roggo. Vue aérienne de la Pila, 29 septembre 2007).	98
Figure 68 : Position des points de données disponibles dans la décharge de la Pila (concentrations en PCB en mg/kg ms).	99

Figure 69 : Cartographie sur la grille fine de la probabilité de dépassement du seuil 10 mg/kg ms. Visualisation du volume correspondant aux probabilités supérieures à 0.5 (figure du haut) et de différentes couches horizontales (figures du bas).	100
Figure 70 : Répartition des volumes estimés de matériaux contaminés par classe de teneurs en PCB (en mg/kg ms) selon la taille des blocs d'excavation considérés.	101
Figure 71 : Vue de la zone d'étude et des anciens bâtiments.	102
Figure 72 : À gauche : Campagnes de sondages réalisées en 1999 (rouge), 2007 (vert), 2009 (noir) et 2010 (bleu). À droite : première cartographie en 2007.	102
Figure 73 : À gauche : cartographie de la probabilité de dépassement de seuil (seules les zones à plus de 30% de risque apparaissent) et ancienne topographie du site avec bassin des eaux « mères » et douve. À droite : décision de découpage du site en plusieurs zones d'excavation.	103
Figure 74 : Lien entre niveau de détail lors des investigations (abscisse) et coûts associés (d'après (Hubé, 2008)).	107

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Données indirectes valorisables dans un modèle (liste non exhaustive).	11
Tableau 2 : Valorisation géostatistique actuelle de diverses mesures géophysiques ou de terrain. ...	52
Tableau 3 : Logiciels de modélisation géostatistique (liste non exhaustive).	54
Tableau 4 : Formations en géostatistique appliquée à l'environnement (liste non exhaustive).	57
Tableau 5 : Directives et guides évoquant la position des autorités vis-à-vis de la géostatistique (liste non exhaustive)	59
Tableau 6 : Nombre d'articles scientifiques sur le thème de la géostatistique appliquée aux sites pollués recensés dans la base de données isi web of science.	62
Tableau 7 : Nombre d'articles «géostatistique et sites pollués » par type de polluants.	63
Tableau 8 : Centres de compétences en géostatistique de l'environnement (liste non exhaustive). ..	65
Tableau 9 : Provenance par pays des réponses au questionnaire (acteurs ayant été confrontés à des études géostatistiques).	81
Tableau 10 : Seuils de contamination considérés pour les trois polluants et seuils d'admissions en CET.	95
Tableau 11 : Tonnages de terres contaminées répartis en fonction de leur destination : comparaison entre estimation géostatistique et quantités éliminées après le chantier.	96
Tableau 12 : Tonnages de terres contaminées répartis en fonction de leur destination : comparaison entre estimation géostatistique à maille 1m (Antea) et à maille 10 m.	96
Tableau 13 : Comparaison des tonnages par classe pour une simulation à maille 1 m et la simulation correspondante à maille 10 m (en tonnes).	97
Tableau 14 : Filière d'élimination des matériaux selon leur charge en PCB.	99
Tableau 15 : Volumes estimés de matériaux (en m ³) répartis en fonction de leur filière d'élimination, et intervalles de confiance associés. Calculs sur la grille fine 2 m x 2 m x 2 m	100
Tableau 16 : Relation entre objectif d'étude, nombre de données nécessaires, type d'approche géostatistique et coût/temps associé.	109
Tableau 17 : Liste des personnes ayant répondu au questionnaire envoyé aux professionnels.	123

1. Introduction

1.1. Objectifs

La géostatistique est appliquée au domaine des sites et sols pollués (SSP) depuis une quinzaine d'années. L'utilisation actuelle de ces techniques sur des cas réels dans un contexte opérationnel intervient après une phase de recherche et développement, où les capacités et les conditions de mise en œuvre de ces outils ont été étudiées de manière approfondie (voir p.ex. (Jeannee, 2001) et (H Demougeot-Renard, 2002) pour des cas de pollutions chimiques, et (Desnoyers, 2010) pour des cas de pollutions radiologiques), et une phase de promotion et de diffusion de l'information sur le sujet par des associations professionnelles telles que GeoSiPol¹.

La géostatistique est désormais considérée comme un des moyens techniques pouvant être mis en œuvre dans le cadre d'un diagnostic ou d'une réhabilitation de site pollué, pour modéliser un phénomène spatialisé et en estimer l'incertitude. Elle fournit un cadre méthodologique rigoureux pour cartographier les contaminations en place, estimer les volumes et tonnages de matériaux contaminés et optimiser les stratégies d'échantillonnage. Elle permet en outre d'intégrer différents types d'informations sur la pollution et d'augmenter ainsi la précision des modèles, que ce soit des analyses de laboratoire de divers paramètres, des mesures sur site ou bien encore des mesures géophysiques. La possibilité apportée par la géostatistique de quantifier les incertitudes affectant les modèles de distribution spatiale de la pollution et de les transférer à des modèles de risques financiers ou sanitaires en constitue un intéressant outil d'aide à la décision.

La géostatistique reste cependant un simple outil qui ne prétend répondre à l'ensemble des problèmes posés par la revalorisation des sites pollués. Sa mise en œuvre nécessite de plus un certain savoir-faire ainsi qu'une communication efficace entre les différents acteurs impliqués. Ces éléments ont pu faire défaut lors de certaines expériences passées ou conduire à des applications inappropriées, générant des résultats décevants et inadaptés.

Au terme de quinze années d'application de la géostatistique aux sites et sols pollués, quel bilan peut-il en être fait, que ce soit au niveau national ou international ?

Dans ce contexte, la présente étude vise à constituer un retour d'expérience critique et objectif de la mise en œuvre de la géostatistique, tant au niveau national qu'international. L'objectif est de dresser d'une part un bilan factuel (sur combien de cas connus de sites pollués la géostatistique a-t-elle été utilisée ? dans quelles situations et avec quels objectifs ?), puis de mener une analyse fine du résultat de ces opérations (les résultats fournis par la géostatistique ont-ils donné satisfaction ? Quelles sont les raisons qui ont conduit au succès ou à l'échec de l'opération ?), pour en déduire des voies d'amélioration possibles de la situation actuelle.

1.2. Travail réalisé / Moyens mis en œuvre

L'équipe de projet a été constituée pour confronter un double point de vue, celui de l'expert sites et sols pollués amené à utiliser la géostatistique dans ses études (ANTEA) et celui de l'expert géostatisticien amené à traiter des données de sites et sols pollués (GEOVARIANCES et eOde). Hélène Demougeot-Renard (eOde) et Nicolas Jeannée (GEOVARIANCES) possèdent tous deux une forte expérience en réalisation d'études et de formations liées à l'utilisation de la géostatistique pour la caractérisation des sites pollués, ainsi qu'une implication pour eOde dans la gestion des sites pollués en tant qu'autorité. Stéphane Belbèze (ANTEA) apporte au projet ses compétences en méthodes géophysiques ainsi que le retour d'expérience d'ANTEA sur la mise en œuvre des méthodes géostatistiques.

Le retour d'expérience constitué est basé sur i) une synthèse bibliographique des travaux publiés dans différents pays, ii) l'exploitation d'études pour lesquelles la validité des prédictions géostatistiques a pu être évaluée, et iii) une enquête menée auprès d'acteurs impliqués dans la caractérisation de sites pollués (bureaux d'étude, industriels, organismes publics) qui ont pu mettre en œuvre ce type d'approches.

Ces éléments sont complétés par un état de l'art synthétisant les principaux objectifs et concepts géostatistiques. Les résultats issus des travaux déjà financés par l'ADEME (projets r&d Outrage et Repérage, manuel méthodologique et études de démonstration du groupe de travail GeoSiPol) sont intégrés à cet état de l'art. La présente étude se démarque néanmoins des précédentes par une vision plus large et plus critique de la problématique.

¹ <http://www.geosipol.org>

Le travail réalisé permet d'établir une mise à plat de l'utilisation actuelle de la géostatistique pour la caractérisation de sites et sols pollués et de discuter sa complémentarité avec certaines techniques d'investigation, telles que les mesures géophysiques. Il en découle des recommandations de bonnes pratiques destinées à garantir le succès de son application dans un contexte opérationnel, et/ou des axes de recherche et développement qui permettraient de combler des lacunes théoriques ou méthodologiques identifiées au cours du projet.

1.3. Cadre et limites de l'étude

L'étude traite la question des pollutions chimiques et / ou radiologiques, qu'elles soient diffuses ou localisées, affectant potentiellement les milieux suivants : les sols (anciennes friches, décharges, ...), les sédiments (rivières, ports...) et les bétons (installations en cours de démantèlement).

La pollution des eaux souterraines sort du cadre de l'étude, bien que quelques références bibliographiques ayant trait à ce milieu soient discutées lors de la présentation de l'état de l'art (cf. p.ex. le paragraphe 6.2 de la page 72).

1.4. Organisation du rapport

La structure du rapport reprend successivement les différentes phases du travail réalisé.

Après cette introduction, le **chapitre 2** décrit les différents types de données, directes ou indirectes, pouvant être utilisés pour construire un modèle géostatistique d'une pollution, puis le **chapitre 3** présente brièvement les concepts et méthodes géostatistiques et leur application aux sites et sols pollués. Ces deux chapitres sont destinés avant tout aux lecteurs non familiers de ces méthodes.

Le **chapitre 4** détaille les conditions d'intégration de données renseignant indirectement sur la pollution dans les modèles, qui peuvent à moindre coût en améliorer la précision. L'accent est porté sur la complémentarité de la géostatistique avec des mesures géophysiques et des mesures rapides sur site, en présentant quelques retours d'expérience concrets de couplage de ces outils.

Le **chapitre 5** dresse un tour d'horizon des moyens actuels à disposition pour mettre en œuvre la géostatistique dans les études : offres de logiciels et de formations, position des autorités et état de la recherche dans le domaine. Une revue bibliographique permet finalement de dresser un panorama des méthodes actuellement utilisées et des types de cas traités.

Les dernières innovations scientifiques relevées dans le cadre de la revue bibliographique à l'échelle internationale sont détaillées au **chapitre 6**, celui-ci s'adressant plus particulièrement aux lecteurs familiarisés avec l'approche géostatistique.

Le **chapitre 7** présente les résultats de l'enquête réalisée auprès des professionnels ayant été confrontés à l'utilisation de la géostatistique dans l'évaluation de sites. Un ensemble de 4 cas d'étude réels sont présentés sous forme de fiches au **chapitre 8**. Elles intègrent une analyse des raisons qui ont conduit au succès ou à l'échec de l'utilisation de la géostatistique.

L'ensemble de ces éléments permet au final au **chapitre 9** de mener une synthèse critique de la situation actuelle, d'identifier les éléments de succès et de proposer des solutions pratiques pour remédier aux problèmes recensés. Des axes de recherche & développement sont également suggérés.

Les points clés de l'étude sont finalement repris en guise de conclusion.

Les informations de détail ou requérant un niveau plus avancé en géostatistique apparaissent en italique dans le texte.

1.5. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier pour leur participation à cette étude à la fois le comité de suivi du projet, l'ensemble des personnes ayant répondu à l'enquête sur l'utilisation de la géostatistique en sites et sols pollués ainsi que les fournisseurs de fiches de cas.

2. Les données valorisables dans un modèle

Les modèles géostatistiques dépendent très fortement des données à disposition, que ce soit leur nombre, leur qualité, leur position relative ou leurs caractéristiques (type, précision). Le nombre de données est un paramètre particulièrement déterminant car l'incertitude associée aux modèles diminue, en général, avec l'augmentation du nombre de données disponibles².

On constate cependant que rares sont les cas où toutes les données pouvant renseigner sur la contamination d'un site sont valorisées. On s'attache trop souvent aux **seules données renseignant directement** la variable d'intérêt, telles que les analyses de laboratoire dans le cas des contaminations chimiques. D'autres informations sont pourtant dans la plupart des cas disponibles, acquises au cours des différentes phases d'investigation, renseignant de manière indirecte sur la situation de pollution. Ce sont par exemple des mesures de terrain, des observations organoleptiques (p.ex. couleur ou odeur typiques d'une pollution) ou des mesures géophysiques.

Ces données dites indirectes sont souvent moins fidèles voire moins justes (présence de biais) que les analyses de laboratoire, mais en compensation plus nombreuses du fait d'un coût réduit et d'une plus grande rapidité d'acquisition. En dépit de leur moindre précision, elles présentent donc un grand intérêt pour les modèles à condition d'y être intégrées à l'aide de techniques statistiques et géostatistiques adaptées. Notons par ailleurs que les analyses de laboratoire peuvent également être sujettes à des problèmes de représentativité, en raison notamment de la forte influence des conditions de prélèvement et/ou de préparation de l'échantillon, et de la fidélité insuffisante de certaines déterminations analytiques.

2.1. Les données directes

Les données directes sont dans la plupart des cas constituées de mesures de laboratoire, concentrations en substances minérales ou organiques dans le cas des pollutions chimiques, activités volumiques ou massiques dans le cas des contaminations radiologiques (IRSN, 2011). Plusieurs substances peuvent avoir été analysées, avec parfois davantage de données et une meilleure continuité spatiale pour certaines d'entre elles : en cas de corrélation (spatiale ou non spatiale), les substances les mieux renseignées peuvent alors être utilisées pour améliorer l'estimation des autres.

2.2. Les données indirectes

Sur la base de notre expérience et de la littérature sur le domaine (Jeanne & de Fouquet, 2003), les données indirectes qui ont pu être recensées sont détaillées dans le Tableau 1. Elles sont de plusieurs types : certaines peuvent être représentées par des variables **continues** (C) et sont directement utilisables dans un modèle : cas des mesures in situ de radioactivité. D'autres constituent des variables **catégoriques** ou **qualitatives** (Q) qui doivent être préalablement codées en variables **indicatrices** : cas des variables « présence/absence de goudron » et « lithologie », où une valeur numérique est attribuée à chacune des catégories pour les différencier.

Notons que, lorsqu'elles constituent l'objet essentiel des investigations, certaines données indirectes peuvent être considérées comme la variable principale d'étude et par conséquent devenir données « directes » ; cela est notamment le cas pour les mesures XRF ou géophysiques.

Tableau 1 : Données indirectes valorisables dans un modèle (liste non exhaustive).

Type de variable	Description
C	- Paramètres physico-chimiques mesurés au laboratoire et/ou sur site : concentration en matière organique, pH, potentiel redox, teneur en argile du sol, granulométrie,...
Q	- Lithologie, types de sols et matériaux anthropiques souterrains (sables, marnes, remblais, cendres,..)
C	- Mesures de concentration en polluants de terrain : métaux à l'aide d'un analyseur portable à fluorescence de rayons X (XRF), composés organo-halogénés volatils à l'aide d'un détecteur par photo-ionisation (PID) ou par diagraphie MIP (Membrane Interface Probe),...
C	- Mesures in situ du rayonnement ambiant : taux de comptage, spectrométrie gamma à

² L'augmentation du nombre de données ne s'accompagne pas de réduction significative de l'incertitude en cas de phénomène non structuré (effet de pépite pur).

Type de variable	Description
	l'aide d'un détecteur à scintillation NaI (Bugai et al., 2005), ...
C	- Mesures géophysiques : ces techniques non intrusives permettent de fournir des informations indirectes sur la structure et l'état du sous-sol sous forme de paramètres physiques ; elles sont appliquées aux sites et sols pollués pour étudier la géométrie des domaines contaminés, leurs différentes couches constitutives et éventuellement localiser une pollution. Certaines techniques sont également destinées à identifier des objets enfouis (ex. canalisations, anciennes fondations,...).
Q	- Informations organoleptiques : odeurs (en gardant à l'esprit la problématique hygiène et sécurité que cela peut présenter), couleurs caractéristiques de certaines substances,...
Q	- Informations historiques ou jugement d'expert : les enquêtes, menées en général en préalable aux investigations techniques, sur l'historique des activités industrielles ayant pu amener à une contamination du milieu (production, stockage et/ou rejet de substances toxiques) permettent de localiser les secteurs potentiellement contaminés ; les experts du domaine peuvent également, de par leur propre expérience, suspecter préférentiellement la contamination de certaines zones.
C	<ul style="list-style-type: none"> - Communautés microbiennes: les caractéristiques physico-chimiques des milieux contaminés induisent le développement de communautés bactériennes spécifiques qu'il est possible désormais d'identifier (à l'aide de leur patrimoine génétique). (Mouser, Rizzo, Roling, & Van Breukelen, 2005) ont eu l'idée d'utiliser les profils microbiens comme information secondaire, au même titre que d'autres paramètres physico-chimiques, pour caractériser la pollution d'une ancienne décharge. - D'autres indicateurs biologiques (p.ex. micro-organismes, invertébrés du sol, flore) peuvent également renseigner indirectement sur la qualité des sols.

3. Les méthodes géostatistiques et leur application aux SSP

La construction d'un modèle géostatistique à partir de données collectées sur un site implique un certain nombre d'étapes mettant en œuvre des concepts et méthodes spécifiques. Les paragraphes ci-dessous les décrivent de façon simple pour des lecteurs qui ne seraient pas familiarisés avec la méthodologie géostatistique. Une présentation plus approfondie de la démarche peut être trouvée dans le manuel méthodologique du groupe de travail GeoSiPol (Chiles et al., 2005) ainsi que dans les éléments bibliographiques présentés aux chapitres 5 et 6.

3.1. Bref historique du développement de la géostatistique

Les méthodes géostatistiques ont été développées dans les années cinquante pour les besoins de l'industrie minière par l'ingénieur D.G.Krige. Leur formalisme a été mis en place une décennie plus tard à l'Ecole des Mines de Paris par le professeur G.Matheron, créateur puis directeur du Centre de Géostatistique en 1967. Les années suivantes ont connu le développement de diverses méthodes (estimation linéaire, estimation non linéaire, simulation) et l'élargissement des domaines d'application de la géostatistique. De nouveaux centres de recherche sont apparus, et la géostatistique est devenue un outil incontournable dans certains domaines tels que l'exploitation pétrolière ou minière.

L'application de la géostatistique aux sites et sols pollués a été initiée il y a une vingtaine d'années avec de premiers travaux de recherche sur des cas de pollutions chimiques présentés dans le cadre de la conférence geoENV (international conference on geostatistics for environmental applications) au début des années 90'.

3.2. Principaux concepts et méthodes géostatistiques

La géostatistique désigne un ensemble de méthodes et un formalisme mathématique qui permettent de décrire quantitativement des phénomènes présentant une variabilité spatiale et/ou temporelle. Elle diffère de la statistique classique par le fait qu'elle prend en compte la localisation des données. Sur la base d'une étude des données disponibles de la variable d'intérêt, elle permet d'en estimer les valeurs en tout point du domaine d'étude, là où on ne dispose d'aucune information. Elle permet en outre de fournir une estimation de l'incertitude de la valeur estimée en chaque point (Figure 1).

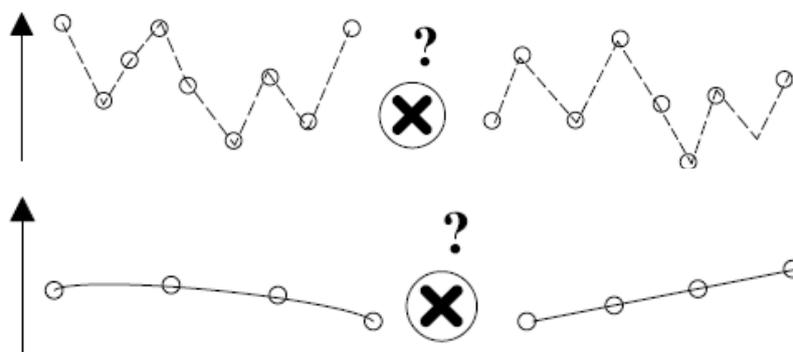


Figure 1 : Quelle estimation en un point à partir des données voisines ? Et quelle incertitude associée ? Dans les deux cas présentés, l'estimation pourra être la même ; en revanche l'incertitude associée sera différente car la continuité spatiale n'est pas identique.

3.2.1. Analyse exploratoire et variographique

La première étape après la collecte des données consiste à en réaliser une analyse exploratoire permettant le **contrôle qualité** de ces données, leur validation ainsi qu'une première interprétation des niveaux de pollution. Différents outils sont disponibles à cet effet: plans de position, histogrammes, statistiques classiques, nuages de corrélation, variogrammes, etc. Les principaux outils permettant d'étudier les variables prises individuellement sont présentés ci-dessous. Les outils destinés à l'étude des corrélations entre variables sont décrits dans le chapitre 2 à partir de la page 11.

- Plan de position

Il permet de représenter l'emplacement des mesures sur le site et souvent de détecter la présence de coordonnées aberrantes pour certains échantillons/sondages ; utilisé avec une échelle de couleurs, il fournit déjà une première appréciation des zones présentant des valeurs élevées pour la contamination considérée ainsi que le repérage d'éventuelles valeurs anormales.

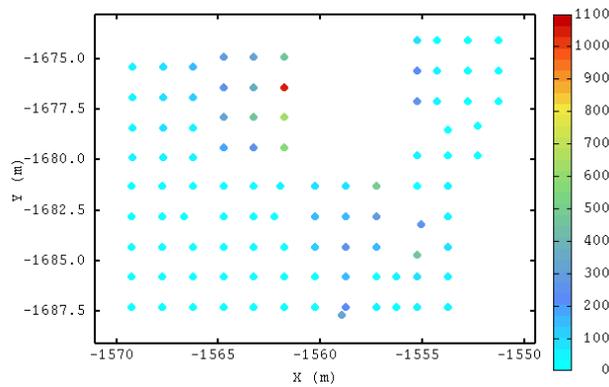


Figure 2 : Plan de position de données associé à une échelle de couleurs.

- Histogramme et statistiques classiques

En général associé à des statistiques classiques telles que le minimum, le maximum, la moyenne, l'écart-type, la médiane et quelques quantiles, l'**histogramme** permet d'apprécier la distribution des données : présence de valeurs extrêmes, dissymétrie avec beaucoup de valeurs faibles et peu de valeurs fortes par exemple, mais aussi bimodalité pouvant révéler la présence de plusieurs populations distinctes...

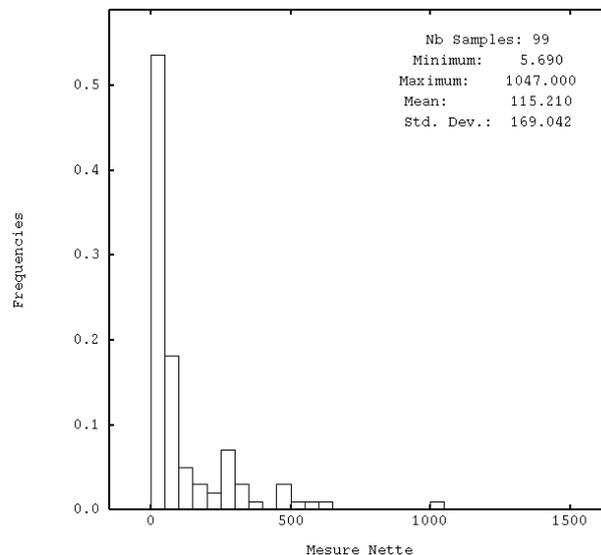


Figure 3 : Histogramme et statistiques typiques de données de pollution.

- Analyse variographique

L'intérêt de la géostatistique consiste en particulier à prendre en compte la continuité (structure) spatiale de la variable que l'on souhaite cartographier. Les situations sont très diverses : la dissémination aérienne de poussières à partir d'une cheminée induira probablement un phénomène de contamination des sols très continu, avec une décroissance régulière de la pollution dans la direction principale des vents. Une contamination peu mobile inhérente à des remblais déposés sans logique sur un site risque fort d'être très peu continue, des matériaux contaminés pouvant côtoyer des matériaux sains sans que cela soit prévisible.

Cette continuité spatiale est appréhendée par le **variogramme**, d'abord calculé expérimentalement puis modélisé.

Le variogramme expérimental est construit à partir de la **nuée variographique**, qui représente, pour chaque couple de mesures, le demi-écart au carré de la différence des valeurs en fonction de la distance entre les points de mesure.

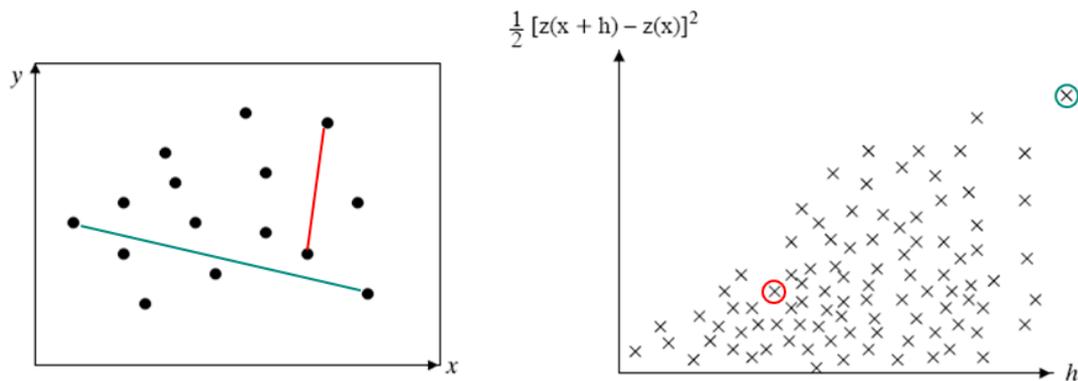


Figure 4 : Plan de position et nuée variographique avec mise en évidence de deux paires de points.

Le variogramme expérimental est alors obtenu en moyennant, par classe de distance sur la nuée variographique, la contribution apportée en termes de variabilité par l'ensemble des couples de mesure. Une tolérance de calcul sur la distance est utilisée pour permettre la construction du variogramme expérimental :

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{x_j - x_i \sim h} [z_j(x+h) - z_i(x)]^2$$

h représente la distance de calcul du variogramme, z_i et z_j les valeurs de la variable et $N(h)$ représente le nombre de couples distincts de points tels que $x_j - x_i \sim h$.

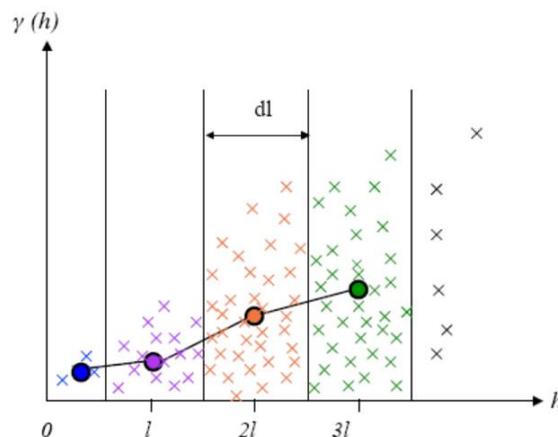


Figure 5 : Construction du variogramme expérimental à partir de la nuée variographique.

En présence d'un phénomène structuré (continu), la variabilité spatiale augmente avec la distance et tend à se stabiliser à partir d'une distance appelée « distance de corrélation maximale » ou **portée**. Les mesures séparées par une distance supérieure ne présentent plus de corrélation spatiale.

Le variogramme expérimental est donc calculé pour des distances multiples du pas de calcul et est seulement connu de manière discrète. Afin de connaître la variabilité quelle que soit la distance et la direction (en cas d'anisotropie) considérées, il est nécessaire de trouver un modèle théorique de variogramme qui, tout en respectant certaines conditions mathématiques, ajuste de manière satisfaisante le variogramme expérimental.

Il est alors important d'adopter un principe d'économie en recherchant le modèle le plus simple possible respectant l'interprétation de la structure spatiale.

D'autre part, deux caractéristiques importantes d'un variogramme doivent être identifiées :

- Le **comportement à l'origine** traduit le degré de régularité de la régionalisation. Il peut être discontinu (effet de pépite), linéaire (phénomènes continus mais non dérivables) ou parabolique (phénomènes très réguliers). La modélisation de la structure spatiale pour les petites distances étant prépondérante dans les calculs d'estimation qui vont suivre, il est

important de caler la modélisation au plus près des premiers points du variogramme expérimental.

- La présence d'un **palier**, valeur de la variabilité si elle se stabilise à partir d'une certaine distance appelée portée, est synonyme de stationnarité d'ordre 2 et représente la distance maximale de corrélation.

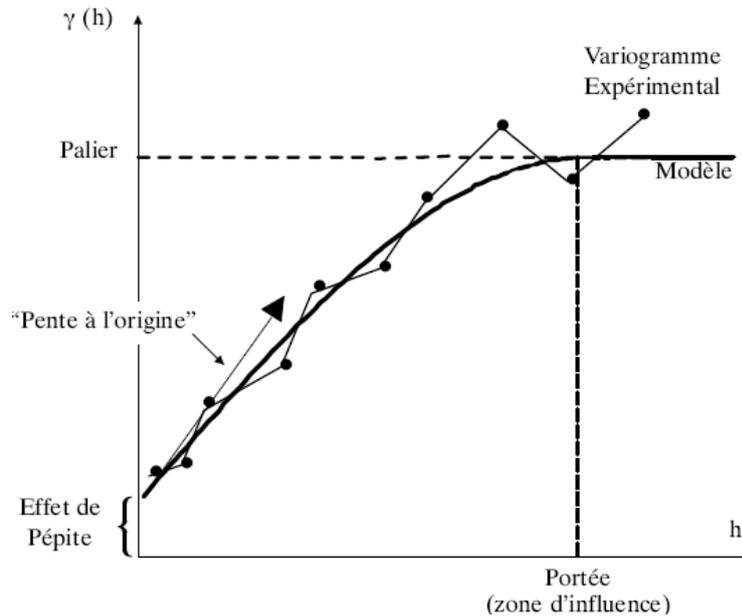


Figure 6 : Variogramme expérimental (points) et modélisation de la structure spatiale (trait épais).

La modélisation d'un variogramme expérimental nécessite souvent l'utilisation conjointe de plusieurs composantes : on parle de **structures gigognes** qui sont la combinaison de plusieurs schémas élémentaires. Souvent, les différentes structures ont une signification physique. Une discontinuité importante à l'origine, du fait d'une forte variabilité à petite distance, peut provenir d'erreurs de mesure ou de positionnement, voire d'une microstructure non captée par la maille d'échantillonnage. Des portées différentes correspondent souvent à des comportements physiques à des échelles différentes (voir paragraphe 6.1.4 page 71 sur l'analyse par krigeage factoriel de phénomènes complexes).

En pratique, cette décomposition, et donc la modélisation du variogramme expérimental, n'est pas unique : plusieurs modèles peuvent être acceptables. Il faut donc employer à bon escient le principe d'économie en essayant de ne pas complexifier à outrance la modélisation du variogramme, tout en gardant une interprétation cohérente et compatible avec l'information disponible.

De plus, la présence de distributions très dissymétriques pour les teneurs (majorité de valeurs très faibles, voire inférieures à la limite de détection, et quelques valeurs élevées) peut rendre délicate l'identification de la structure spatiale du phénomène, i.e. l'analyse variographique. Dans pareil cas, il est fréquent de recourir à une transformation préliminaire des données, par exemple logarithmique, afin d'atténuer le poids des quelques valeurs fortes dans l'analyse (voir paragraphe 6.1.1 à la page 68).

3.2.2. Cartographie par krigeage

Une fois l'analyse exploratoire menée jusqu'à l'obtention d'un modèle de variogramme, une cartographie par **krigeage** de la variable d'intérêt peut être réalisée. L'interpolation par krigeage en un point x_0 , notée $\hat{z}(x_0)$, est obtenue par une combinaison linéaire pondérée des n données mesurées aux points x_i :

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i)$$

Le krigeage se différencie uniquement des autres interpolateurs classiques (p.ex. méthode d'inverse des distances) dans le choix des coefficients λ_i , appelés poids de krigeage, qui dépendent :

- des distances entre les données et la cible x_0 (tout comme les interpolateurs classiques),
- des distances séparant les données entre elles (prenant en compte d'éventuels regroupements),

- de la structure spatiale du phénomène.

La résolution du système de krigeage permet de trouver ces poids tout en :

- garantissant le non-biais de l'estimation,
- minimisant la variance de l'erreur d'estimation $Var[Z - \hat{Z}]$, ce qui revient intuitivement à minimiser le risque d'erreur.

En ce sens, le krigeage constitue le **meilleur estimateur linéaire sans biais**.

En chaque point du domaine de modélisation, l'estimation par krigeage est accompagnée d'une quantification de l'incertitude associée, appelée variance de l'erreur de krigeage. Elle est nulle si l'estimation est réalisée sur un point de donnée et augmente à mesure que l'on s'éloigne des données, indiquant une plus grande incertitude dans la valeur estimée.

Cette variance (ou écart-type) de krigeage décrit l'incertitude qui découle de la variabilité spatiale du phénomène. Il importe de garder à l'esprit que cet écart-type peut s'avérer notablement inférieur à l'écart-type de reproductibilité analytique. En effet, dans le cas recommandé où l'ensemble des échantillons est analysé par un unique laboratoire, la part de variance liée à une mauvaise reproductibilité (écarts observés sur un même échantillon par des laboratoires différents) ne peut être évaluée. Par contre, une mauvaise répétabilité (écarts observés sur un même échantillon par le même laboratoire) pourra conduire à l'observation d'un effet de pépité lors du calcul du variogramme expérimental.

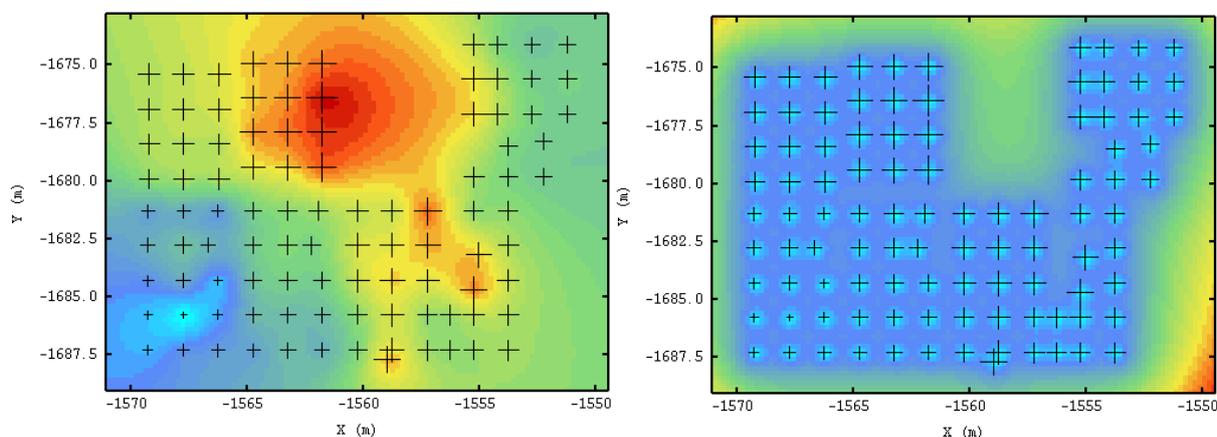


Figure 7 : Cartographie par krigeage et écart-type d'erreur de krigeage associé.

Dans la pratique, l'estimation en un point donné peut être réalisée à partir de tous les points disponibles (voisinage unique) ou uniquement à partir des points situés dans un certain voisinage du point cible (voisinage glissant) pour limiter les lourdeurs calculatoires mais sans effet néfaste sur la cartographie finale (le poids de krigeage attribué à des données très éloignées du point cible tend vers 0).

3.2.3. Analyse de risque

3.2.3.1. Limites du krigeage

Par construction, le krigeage est un interpolateur qui ne reproduit pas la variabilité réelle d'un phénomène (effet de « lissage »). En effet, le krigeage vise à minimiser le risque d'erreur en chaque point et ne peut donc en même temps reproduire la variabilité réelle.

Or dans la pratique et dans les cadres réglementaires actuels, la prise de décision sur site pollué repose sur une analyse de risque, au niveau local ou global. Il s'agit alors de déterminer les secteurs présentant des dépassements de valeurs de référence (seuils), et il s'avère essentiel dans ce cas de reproduire la variabilité du phénomène. L'application de seuils à des images « lissées » de la réalité conduirait en effet à sur- ou sous-estimer l'ampleur des secteurs contaminés, et par suite les surfaces, volumes ou masses de matériaux associés.

3.2.3.2. Simulations géostatistiques

La géostatistique fournit une réponse cohérente aux questions qui font appel à des opérateurs non linéaires comme l'application d'un seuil ou le calcul d'un volume exposé à un dépassement de ce seuil. Parmi les méthodes utilisables, les **simulations** sont les plus souples. Elles donnent la

possibilité de simuler en chaque point de l'espace un scénario pour la variable étudiée de telle façon que la distribution statistique de la variable, mise en évidence par l'histogramme, et les caractéristiques de la variabilité spatiale, au travers du variogramme, soient reproduites. Une simulation est ainsi une image possible du phénomène là où le krigeage s'intéresse à fournir l'image la plus probable. Le krigeage lisse ainsi le phénomène étudié tandis qu'une simulation en reproduit toute la variabilité. La simulation est, par ailleurs, dite **conditionnelle** lorsqu'elle est calée aux données et retrouve les valeurs des mesures en ces points.

De nombreuses techniques de simulation ont été développées ; la plupart d'entre elles travaillent dans un cadre gaussien. Cette hypothèse étant rarement observée en pratique, on réalise au préalable une transformation de la variable étudiée en une variable gaussienne par une fonction de transformation, telle que l'anamorphose. Ce qui revient intuitivement à déformer l'histogramme de départ en un histogramme gaussien. Les simulations sont alors réalisées sur cette transformée gaussienne, les simulations finales des teneurs étant déduites des simulations gaussiennes par application de la fonction de transformation inverse (anamorphose inverse).

3.2.3.3. Estimations globales

Les simulations apportent une information très riche et permettent de calculer des grandeurs globales comme le volume total dépassant un certain seuil en calculant ce volume pour chaque simulation puis en estimant les caractéristiques statistiques de la distribution de volumes équiprobables obtenue (post-traitement) : moyenne, médiane, variance, intervalle de confiance.

De cette façon, la Figure 8 illustre le post-traitement de surfaces dont les concentrations en polluant dépassent un seuil donné. Sur cet exemple, il est raisonnable de s'attendre à traiter environ 99 m² (valeur médiane) de surface dépassant le seuil considéré avec un intervalle de confiance à 90 % compris entre 80 et 116 m².

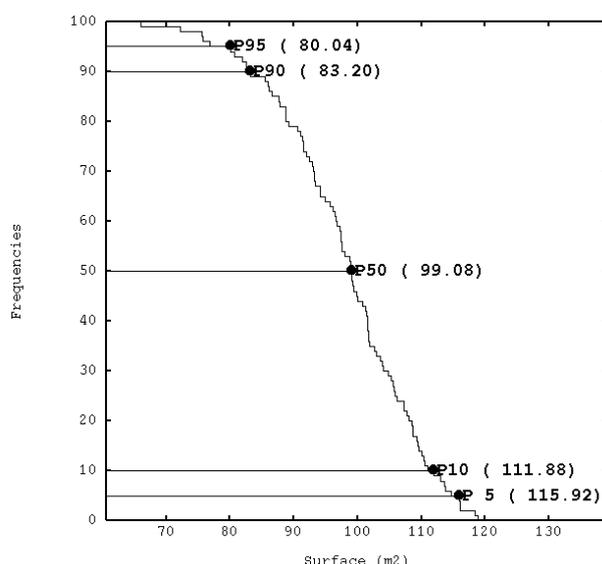


Figure 8 : Post-traitement des surfaces dont les concentrations en polluant dépassent un seuil donné (histogramme cumulé inverse). Indication de quelques quantiles particuliers.

3.2.3.4. Analyses locales, probabilités de dépassement de seuil

L'intérêt des simulations réside dans le fait de calculer un grand nombre de scénarios, permettant ainsi un raisonnement en probabilités. En chaque point cible ou pour chaque maille d'estimation, on a ainsi un histogramme des valeurs possibles (équi-probables), dont la moyenne converge vers le krigeage. En calculant point à point la proportion de réalisations dépassant l'objectif de qualité, on obtient une carte d'estimation de la probabilité de dépassement de ce seuil.

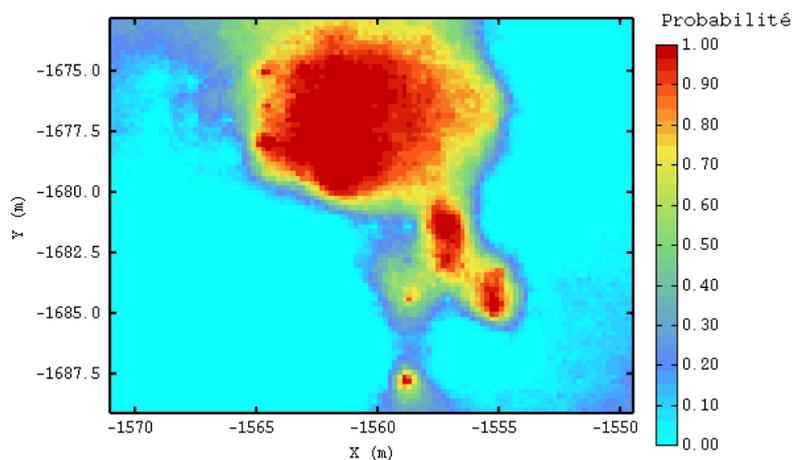


Figure 9 : Carte de probabilité de dépassement de seuil.

D'autres cartes peuvent être utiles au projet d'assainissement :

- Cartes de quantiles p qui représentent les valeurs telles que les vraies valeurs ont $p\%$ de chance d'être plus faibles ;
- Cartes d'intervalles de confiance qui représentent la largeur d'un intervalle compris entre deux quantiles.

Notons que ces cartes de quantiles apportent une réponse à certaines contraintes transcrites dans le droit de l'environnement, notamment concernant la gestion du percentile à 95%.

L'utilisation des simulations permet donc de décider des zones à assainir en fonction des seuils retenus et des niveaux de confiance souhaités, d'estimer les quantités de terre à excaver ou à traiter, et donc de prévoir la durée, le coût et la logistique associés.

Ces deux types de résultats, analyses locales et estimations globales, sont complémentaires et interviennent respectivement pour localiser les zones contaminées à excaver ou à traiter, et pour obtenir des quantifications d'un point de vue global pour la prise de décision en amont des travaux.

Remarque : Contrairement aux estimations globales, les estimations locales peuvent être directement obtenues à partir des propriétés théoriques de la distribution gaussienne par la méthode de l'espérance conditionnelle et donc sans passer par la mise en œuvre de simulations (voir chapitre 6.1 à la page 68).

3.2.4.Support de mesure, d'estimation, d'excavation...

Tout au long de la phase de modélisation des concentrations, une attention particulière doit être portée à la question du **support**. Celui-ci caractérise le volume que l'on considère, aussi bien au moment de l'échantillonnage qu'au moment des cartographies ou du traitement des terres.

Au moment de l'échantillonnage, il faut veiller à ce que le volume de prélèvement soit le plus homogène possible pour l'ensemble des échantillons. Lorsque des volumes différents ont été utilisés, au cours de campagnes différentes par exemple, le traitement conjoint des différents types d'échantillons ne peut pas être réalisé directement.

La question du support devient cruciale lors de l'estimation de volumes de terres polluées. Selon le support choisi (taille de la maille de traitement), le volume de terres excédant un seuil varie comme illustré ci-dessous (**effet de support**). Ainsi, la maille considérée dans l'analyse géostatistique doit être en accord avec la maille choisie pour le traitement des terres (voir également le paragraphe 6.1.3 à la page 70).

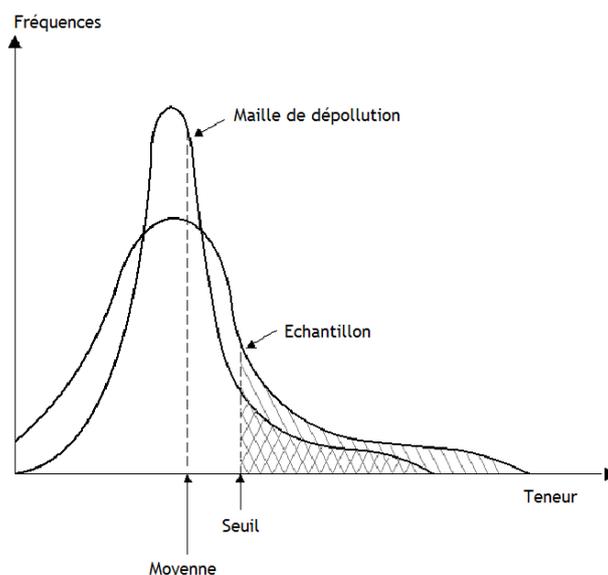


Figure 10 : L'effet de support : variation du volume excédant un seuil en fonction de la maille considérée.

Lorsque l'on réalise des cartes de probabilité de dépassement de seuil, il est également important de prendre en compte ce support puisque la variabilité et donc la probabilité de dépassement de seuil changent avec le support d'estimation.

3.2.5. Sensibilité du modèle géostatistique aux paramètres

Qu'il vise à l'obtention d'une cartographie par krigeage ou à la réalisation de simulations en vue d'une analyse de risque, le modèle géostatistique repose sur le choix de certains paramètres clés, qui sont estimés à partir d'une connaissance parcellaire de la pollution. Le choix du modèle de variogramme est le plus important, même si en pratique le choix du voisinage d'estimation peut également jouer un rôle sur la qualité des résultats. Comment s'assurer que ces paramètres sont « bien » choisis ?

Il importe tout d'abord de s'assurer, avant tout calcul de variogramme, que l'on dispose de « suffisamment » de mesures, dans la pratique plus d'une vingtaine. En deçà de ce nombre, le risque de fluctuations associées à l'estimation du variogramme est trop important. Le krigeage comme les simulations sont particulièrement sensibles au choix du modèle de variogramme aux petites distances : effet de pépite ou non, régularité du variogramme à l'origine. Au-delà de l'information apportée par les mesures, la connaissance a priori du phénomène et de son hétérogénéité peuvent aider au choix de ce modèle de variogramme. En cas de doute entre plusieurs modèles de variogrammes, il est alors recommandé de tester ces derniers. Plusieurs méthodes sont alors possibles : tout d'abord, la **validation croisée** consiste à retirer une à une chaque donnée et à la ré-estimer à partir des N-1 données restantes. Répétée pour chaque modèle de variogramme, la validation croisée permet d'évaluer si un des modèles retrouve mieux lors de l'estimation les valeurs mesurées. Il est également conseillé d'observer l'impact pratique du choix du modèle sur l'estimation par krigeage et l'incertitude associée afin d'en évaluer la sensibilité.

Ces éléments permettent de réduire dans la pratique, les risques liés à un choix de paramètres géostatistiques inappropriés.

3.3. Quels outils pour quels objectifs ?

Deux grands types de méthodes géostatistiques ont été présentés au paragraphe précédent : le krigeage et les simulations. De nombreuses variantes de ces méthodes sont disponibles à l'heure actuelle et répondent aux diverses situations rencontrées dans les domaines d'application. Des développements méthodologiques sont également encore en cours, comme illustré au chapitre 5.

De son côté, la caractérisation des sites et sols pollués, nécessaire à leur gestion dans des contextes multiples (pollution accidentelle, cession-acquisition d'un site, gestion/orientation de déblais en vue d'un projet immobilier, démantèlement d'une installation nucléaire, prévision de dragage d'une rivière ou d'un port afin d'y restaurer de bonnes conditions de navigation) poursuit divers objectifs.

- Optimisation d'une stratégie d'échantillonnage : comment atteindre un niveau de connaissance suffisant, par rapport à un objectif d'étude, avec un minimum de données positionnées au mieux ?
- Levée de doute (identification de sources, de points chauds,...) ;
- Compréhension de la pollution et de sa répartition spatiale grâce à l'analyse exploratoire des données et aux cartographies ;
- Évaluation de la compatibilité des terres avec l'usage futur du site ;
- Calcul de volumes, masses ou surfaces contaminées au-delà d'un seuil ;
- Orientation de l'excavation ou du traitement des terres et des matériaux (ex. béton) contaminés ;

Ces objectifs permettent eux-mêmes de répondre à des objectifs plus généraux tels que la description de bruits de fond, la contractualisation d'engagements respectifs des parties prenantes ou bien encore, in fine, l'estimation du risque sanitaire.

Se pose alors la question de l'intérêt de la géostatistique en appui à la réalisation de ces tâches, et le cas échéant des méthodes les plus appropriées. Ce sujet est discuté dans les lignes suivantes pour chacun de ces objectifs de caractérisation.

Notons que, pour plusieurs de ces thèmes, les fiches recto-verso contenues dans le manuel méthodologique de l'association GeoSiPol (2005) présentent à la fois les pratiques actuelles ainsi que les apports attendus de la méthodologie géostatistique.

3.3.1. Optimisation d'une stratégie d'échantillonnage

La **stratégie d'échantillonnage**, c'est-à-dire le nombre, la localisation, le phasage et les conditions de prélèvement d'échantillons des milieux à caractériser est une question cruciale se posant à plusieurs reprises en cours d'évaluation de site.

Toute campagne d'échantillonnage 1) répond à des objectifs d'étude précis (quels prélèvements pour quels résultats ?) qui doivent être exprimés le plus clairement possible, et 2) est mise en œuvre sous diverses contraintes (temps, coût, technique...). La stratégie retenue constitue donc généralement un compromis entre contraintes et objectifs.

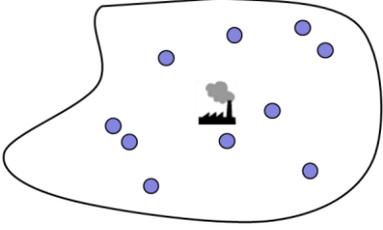
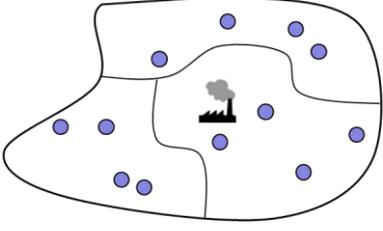
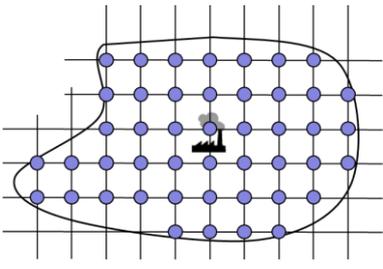
On regroupe généralement les différentes stratégies en deux grandes familles :

- Les échantillonnages probabilistes : fondés sur des considérations statistiques de l'échantillonnage, ils permettent ensuite des inférences statistiques sur l'ensemble du site à partir des données ;
- Les échantillonnages préférentiels : mettant en jeu l'expertise des praticiens, ils nécessitent des connaissances préalables de la zone à investiguer, et le traitement statistique ou géostatistique des données récoltées est ensuite plus délicat.

Les principales approches sont brièvement présentées par famille dans les tableaux ci-dessous, en fournissant quelques-uns de leurs avantages et inconvénients. Illustrées sur des cas 2D, elles s'appliquent de la même façon à des situations 3D où des points de prélèvement doivent également être positionnés le long de sondages verticaux.

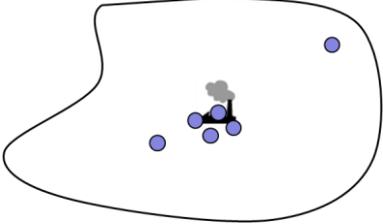
3.3.1.1. Les échantillonnages probabilistes

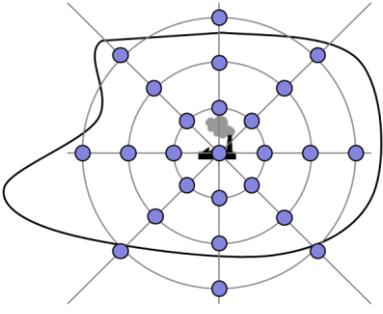
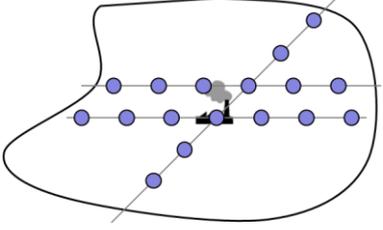
Trois principales approches peuvent être distinguées.

<p style="text-align: center;">Aléatoire</p> 	<p>Les points sont distribués de manière aléatoire sur le site. Sur des zones homogènes (sans contamination, en fin de traitement du site), cette stratégie permet d'exploiter les données à l'aide de tests et de calculs statistiques.</p> <p>+ Utilisation des statistiques classiques.</p> <p>- Trop grande proximité potentielle de certains points. Non adapté dans le cas où le phénomène n'est pas stationnaire : présence d'un gradient de contamination ou de « points chauds ».</p>
<p style="text-align: center;">Aléatoire stratifié</p> 	<p>L'implantation des points se fait de manière aléatoire dans chaque zone homogène préalablement déterminée. Elle nécessite donc une connaissance a priori (natures de sols différentes, contaminations différentes,...) et permet de ne pas mélanger d'informations provenant de populations distinctes.</p> <p>+ Traitement statistique par zones homogènes.</p> <p>- Requiert la définition de sous-domaines. Analyse statistique possible par sous-domaine mais difficile d'un point de vue global.</p>
<p style="text-align: center;">Systematique</p> 	<p>Les points sont positionnés selon une grille régulière (rectangulaire ou triangulaire en général), permettant une mise en œuvre simple aussi bien sur le terrain que pour la préparation du schéma et le traitement des données. En géostatistique, son utilisation permet de cartographier la contamination en raison de la couverture homogène du site et elle constitue l'approche la plus efficace pour minimiser les variances d'estimation.</p> <p>+ Couverture homogène du site, pas de biais, minimisation de la variance d'estimation.</p> <p>- Peut conduire à un grand nombre de points à échantillonner ou à ne pas pouvoir évaluer la variabilité spatiale à petite distance si la maille est lâche.</p> <p><i>Variante</i> : afin de réduire le nombre d'échantillons, il est possible de réaliser un premier maillage assez lâche puis un ré-échantillonnage de certaines zones ou une mise en place de croix de sondages.</p>

3.3.1.2. Les échantillonnages préférentiels

Trois principales approches peuvent être distinguées.

<p style="text-align: center;">Échantillonnage de jugement</p> 	<p>Les points sont positionnés en se fondant sur des connaissances préliminaires ou des dires d'expert. Sans approche théorique ni scientifique, sa pertinence repose uniquement sur la validité du jugement d'expert. Ses applications principales sont la réalisation de levées de doute, d'évaluations de risques et de repérages de sources.</p> <p>+ Nombre restreint de données nécessaires.</p> <p>- Biais dû à la subjectivité du positionnement ; une interprétation probabiliste est difficile, l'échantillonnage préférentiel des zones suspectes conduisant usuellement à surestimer le risque de contamination lorsque l'on cherche à cartographier l'ensemble du site sur base de telles mesures.</p>
---	---

<p>Grilles circulaires</p> 	<p>Les points de mesure sont répartis de manière régulière sur des cercles concentriques. En raison de sa configuration, son utilisation est limitée à la caractérisation d'une contamination en provenance d'une source (rejet atmosphérique, explosion, fuite). Elle permet d'établir un gradient de diffusion et d'identifier l'influence des vents dominants.</p> <p>+ Établissement de gradient de diffusion en fonction de la distance à la source.</p> <p>- Utilisation limitée (configuration spécifique). Données de moins en moins nombreuses lorsque l'on s'éloigne de la source.</p>
<p>Échantillonnage par profils</p> 	<p>Les points de mesure sont positionnés régulièrement le long de lignes particulières. Son emploi est généralement réservé à la caractérisation de structures linéaires (cours d'eau, canalisation), pour lesquelles il est possible de répartir plusieurs lignes parallèles de part et d'autre d'un axe central d'intérêt. Cette stratégie peut être considérée comme probabiliste à une dimension et est utilisée pour l'échantillonnage de sondages, en raison de la géométrie du support de l'information.</p> <p>+ Caractérisation le long de transects, nombre de données limité, échantillonnage de sondages.</p> <p>- Utilisation limitée (configuration spécifique).</p>

Quelle que soit la stratégie d'échantillonnage adoptée, les données collectées pourront faire l'objet d'une étude géostatistique. Certaines configurations nécessiteront parfois des traitements particuliers (ex. dégroupement en cas de resserrments locaux de données, pour réduire le biais sur les statistiques). D'autres permettront de réduire plus facilement l'incertitude d'estimation. Il est également possible de rationaliser, voire d'optimiser les échantillonnages en s'appuyant sur des outils géostatistiques. La géostatistique fournit en effet plusieurs outils aidant à la définition d'échantillonnages complémentaires, tels que :

- La carte de variance de krigeage qui fait ressortir les zones dans lesquelles l'incertitude associée à l'estimation est la plus importante et où de nouveaux échantillons pourraient être collectés.
- La carte de probabilité de dépassement de seuil qui, elle, met en évidence les zones pour lesquelles la prise de décision par rapport à un seuil donné est assortie d'une forte incertitude. Ainsi il devient intéressant de procéder à un échantillonnage complémentaire dans les zones où le risque de dépassement du seuil est intermédiaire.

Les dernières avancées en termes de stratégie d'échantillonnage basées sur une approche géostatistique sont détaillées dans le paragraphe 6.4 à la page 73.

3.3.2. Levée de doute

Lors de la phase initiale de caractérisation, une **levée de doute** permet d'évaluer rapidement la présence ou non d'une contamination, d'identifier les sources et de quantifier sommairement le risque encouru.

Pour réaliser cette levée de doute, un échantillonnage non probabiliste est en général choisi et quelques mesures ou prélèvements sont positionnés par jugement.

A ce stade, une modélisation géostatistique n'est que rarement utile, le résultat analytique ayant pour objectif de valider ou d'infirmer la suspicion de pollution.

3.3.3. Cartographie de la contamination afin de comprendre la répartition spatiale de la pollution

Dans le but de **comprendre** la répartition et l'extension spatiale de la pollution, des **cartographies de contamination** sont réalisées.

Pour les réaliser, il est important de définir une stratégie d'échantillonnage adaptée, puis les données sont analysées d'un point de vue statistique et géostatistique (analyse exploratoire et variographique).

En fonction des données disponibles et de la continuité spatiale de la contamination, l'interpolation peut ensuite être réalisée en réalisant un krigeage ou un cokrigeage (cas multivariable, voir paragraphe 4.4.1 à la page 28). Les estimations géostatistiques sont associées à des cartographies d'incertitudes, permettant d'apprécier la confiance que l'on a concernant les cartes obtenues.

3.3.4.Évaluation de la compatibilité des terres avec les usages futurs (analyse de risques)

Afin d'évaluer la **compatibilité des terres avec les usages futurs** du site, une analyse de risque doit être réalisée. En plus des cartographies de contamination qui permettent de comprendre la répartition de la pollution, des outils d'aide à la décision sont nécessaires.

Le recours à des simulations géostatistiques est alors courant et permet par exemple l'obtention de cartes de probabilité de dépassement de seuil, aidant à distinguer les zones présentant un risque acceptable sans mesures particulières, des zones qui devront être traitées ou excavées.

3.3.5.Calcul de volumes, de masses ou de surfaces contaminées

Si l'on souhaite connaître le volume ou la masse d'un polluant dépassant une certaine teneur globalement sur un site, les **simulations géostatistiques** constituent à ce jour le seul outil opérationnel. Elles permettent par exemple d'estimer un volume probable assorti d'un intervalle de confiance. Ainsi, de nouveau, toutes les incertitudes sont quantifiées, aidant à planifier au mieux les phases de chantier, aussi bien en termes de coût que de délais.

3.3.6.Orientation de l'excavation ou du traitement des matériaux solides

Lors des phases de chantier, les outils géostatistiques peuvent également être mis à profit. Ainsi, en ayant pris en compte la maille (support) d'excavation des matériaux et après avoir choisi un risque acceptable, des cartes de probabilité de dépassement peuvent être calculées pour différents seuils afin de faire apparaître pour chaque maille la classe à laquelle celle-ci appartient, correspondant à des filières de dépollution/valorisation/mise en décharge.

Dans le cas de fortes incertitudes, les cartes de probabilité de dépassement sont également utilisées pour souligner les zones dans lesquelles l'incertitude est plus grande vis-à-vis d'un seuil fixé et où d'éventuels tris en cours de dépollution gagneront à être mis en œuvre.

3.3.7.Evaluation de la pollution résiduelle

Une fois la dépollution réalisée, il est possible d'utiliser le modèle géostatistique pour évaluer l'importance de la pollution résiduelle laissée en place, ainsi que l'incertitude associée. Ces éléments peuvent venir documenter une analyse des risques résiduels.

4. L'intégration des données indirectes dans un modèle

Ce chapitre décrit les conditions à remplir, les méthodes géostatistiques utilisables et la marche à suivre pour intégrer les données renseignant indirectement sur la pollution dans les modèles. Il met ensuite l'accent sur les apports concrets de la géostatistique pour valoriser les mesures géophysiques et rapides sur site.

4.1. Les conditions à remplir pour une intégration utile des données indirectes

Les données indirectes qui ont été présentées et inventoriées au paragraphe 2.2 peuvent contribuer à l'enrichissement du modèle de la variable d'intérêt, dite principale, lorsque certaines conditions sont remplies :

- Des données de la variable principale et des données indirectes ont été collectées **aux mêmes points** (ou blocs pour des échantillons composites représentatifs d'un certain volume) du domaine d'étude. L'étude de la corrélation pouvant exister entre la variable principale et la variable dite secondaire (ou auxiliaire) renseignée par les données indirectes est dans ce cas possible.
- Sur la base de ces données, une **corrélation** est mise en évidence entre la variable principale et la variable secondaire (spatiale ou non spatiale).
- Le nombre de données de la variable secondaire est **plus grand** que le nombre de données de la variable principale (cas hétérotopique), venant ainsi palier le défaut d'informations pour renseigner cette dernière. L'intégration d'informations auxiliaires peut également être intéressante dans le cas isotopique (même nombre de données des deux types de variables) lorsqu'il existe une corrélation significative entre les deux types de données et que les données secondaires sont mieux structurées (meilleure continuité spatiale) que les données primaires.
- Le **support** des données des deux variables est identique (données collectées sur même échantillon) ou bien la relation entre les supports des deux types de données peut être déterminée et modélisée (prise en compte de l'effet de support).

En dehors de ce cadre général d'utilisation des données indirectes, il peut être également intéressant dans certaines situations :

- D'intégrer plusieurs variables secondaires dans le modèle. Il est nécessaire dans ce cas de les hiérarchiser en donnant la priorité à celles dont il est attendu la plus forte réduction d'incertitude.
- De constituer une variable secondaire comme une combinaison d'informations indirectes sur la pollution.

Ainsi, (Mouser et al., 2005) réalisent une analyse en composantes principales (ACP) d'une trentaine de paramètres hydrochimiques et microbiologiques des lixiviats d'une décharge, et en déduisent que la première composante (PC1), qui représente 57% de la variance totale des données initiales, augmente avec la contamination (Figure 11). La conductivité électrique mesurée par une méthode géophysique de subsurface (électromagnétisme, EM-34) étant corrélée spatialement à PC1, cette information a été prise comme variable principale et modélisée par cokrigage (voir paragraphe 4.4.1) en utilisant PC1 comme variable secondaire. Par rapport au krigeage de la seule variable conductivité, ce cokrigage permet de réduire la variance de l'erreur d'estimation de 10% à 15% en de nombreux points du domaine de modélisation. (Vaccaro et al., 2007) proposent quant à eux une alternative à l'ACP : la technique de factorisation de matrice positive, qui permet de mieux tenir compte d'hypothèses sur la physique des phénomènes. Appliquée à des valeurs de métaux et d'éléments CHN mesurés dans les sols, cette technique permet de répartir la variance totale entre la part liée au bruit de fond naturel et celle attribuable à une contamination anthropique.

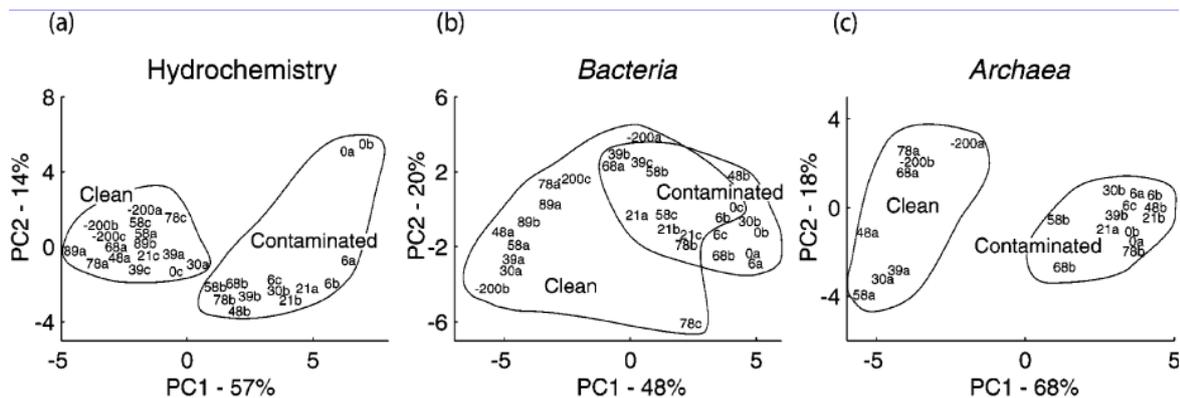


Figure 11 : Premiers et deuxièmes composants obtenus par Analyse en Composantes Principales (ACP) des paramètres hydrochimiques et microbiologiques de lixiviats d'une décharge (Mouser et al., 2005).

4.2. L'étude des relations statistiques entre données

L'évaluation des possibilités d'utilisation de données indirectes passe en premier lieu par une analyse exploratoire où les relations significatives entre les données de la variable principale et de potentielles variables secondaires sont étudiées à l'aide d'outils statistiques adaptés.

4.2.1. Entre variables continues

Lorsque la variable principale et les variables secondaires sont des variables continues, la corrélation entre les données qui les représentent peut être étudiée à l'aide d'outils classiques comme les nuages de corrélation (Figure 12), les coefficients de corrélation ou les analyses en composantes principales. Les outils appliqués doivent être adaptés au type de relation, qui n'est pas forcément linéaire. Certaines relations non linéaires peuvent nécessiter dans certains cas de transformer préalablement les variables de départ pour se retrouver dans ce cadre.

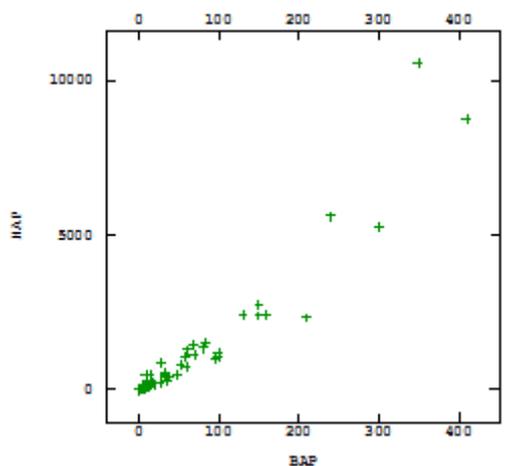


Figure 12 : Exemple de nuage de corrélation entre deux variables ($\rho = 0.96$).

4.2.2. Entre variables continues et catégoriques

Les outils à mettre en œuvre sont différents lorsque la ou les variables secondaires sont catégoriques. Ce cas est fréquemment rencontré sur les sites pollués car des informations qualitatives y sont souvent collectées, telles que la couleur ou l'odeur des matériaux. Or leur utilisation dans un modèle implique leur codification en des variables indicatrices (p.ex. présence/absence d'odeur codée en une variable prenant les valeurs 1 ou 0) qui sont des variables catégoriques. Les statistiques et les histogrammes calculés dans ce cas sont des statistiques et des histogrammes par classe (encore appelés conditionnels).

D'autres outils peuvent encore être utilisés dans les situations complexes. Les auteurs (Jeanne, 2001; Jeanne & de Fouquet, 2003) ont ainsi réussi à résumer plusieurs indices qualitatifs par une analyse factorielle de correspondance (AFC). Appliquée à des indices sur la nature du sol d'une ancienne cokerie, cette technique a permis de constituer un facteur représentatif de plus d'un tiers de la variance totale, faisant la distinction entre des sols anthropogènes et le terrain naturel. Ce facteur

est apparu corrélé (de manière non linéaire), aux concentrations en benzo(a)pyrène mesurées dans les sols, et est apparue de ce fait comme une information auxiliaire intéressante (Figure 13).

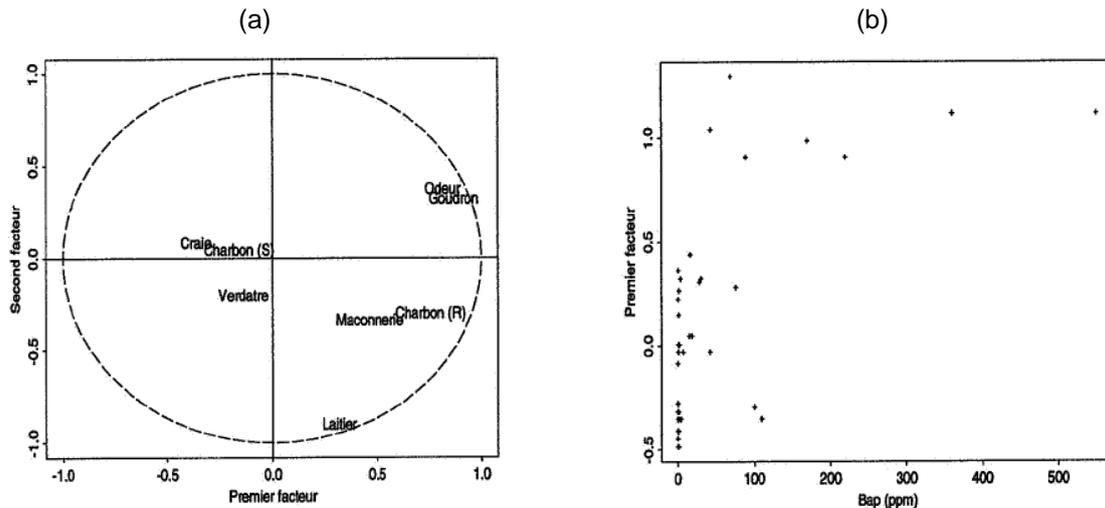


Figure 13 : Analyse des correspondances sur les indices sur la nature du sol d'une ancienne cokerie (a) et nuage de corrélation entre le premier facteur et la concentration en benzo(a)pyrène (Jeannee, 2001).

4.3. L'étude et la modélisation des relations spatiales entre données

Si l'analyse exploratoire a mis en évidence une relation non spatiale entre données directes et indirectes, leur étude est prolongée par la recherche d'une corrélation spatiale. Dans ce cas, les variogrammes simples et croisés entre données (éventuellement préalablement transformées en cas de forte dissymétrie de leur distribution) sont calculés. Les variogrammes simples par variable ont déjà été présentés au paragraphe 3.2.1 à la page 13. Ces derniers ne renseignent pas sur la relation qui unit les deux variables et qui nécessairement varie aussi avec la distance entre points de mesure. On fait donc appel au variogramme croisé, ou éventuellement à la covariance croisée.

Le variogramme croisé entre des données représentatives de deux variables Z et Y se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{N(h)} [z_j(x+h) - z_i(x)] \cdot [y_j(x+h) - y_i(x)]$$

Où x désigne les coordonnées de position d'un point, et $N(h)$ le nombre de couples de points séparés d'une distance h .

Par rapport au nuage de corrélation, qui caractérise la relation existant globalement entre deux variables, le variogramme croisé permet de mettre en valeur des corrélations différentes pour chaque échelle de structuration ; deux éléments chimiques peuvent en effet être corrélés régionalement (anomalies géologiques par exemple) mais présenter localement, à petite échelle, une absence de corrélation, voire une anti-corrélation (mécanismes de transformation entre éléments).

Une fois les variogrammes simples et croisés calculés à partir des données, des fonctions autorisées (modèles de variogrammes) y sont ajustées pour les besoins des calculs ultérieurs (Figure 14). Comme pour les variogrammes simples, les modèles de variogrammes croisés sont construits comme des combinaisons linéaires de quelques structures de base (ex. modèles sphériques, exponentiels).

La difficulté supplémentaire tient aux contraintes que ces fonctions doivent satisfaire pour être admissibles. Les fonctions ajustées sur les variogrammes simples et croisés ne peuvent pas être construites indépendamment les unes des autres, elles doivent assurer que la variance de n'importe quelle combinaison linéaire des variables Z et Y (quels que soient les points considérés et les poids affectés aux variables en tout point) soit positive.

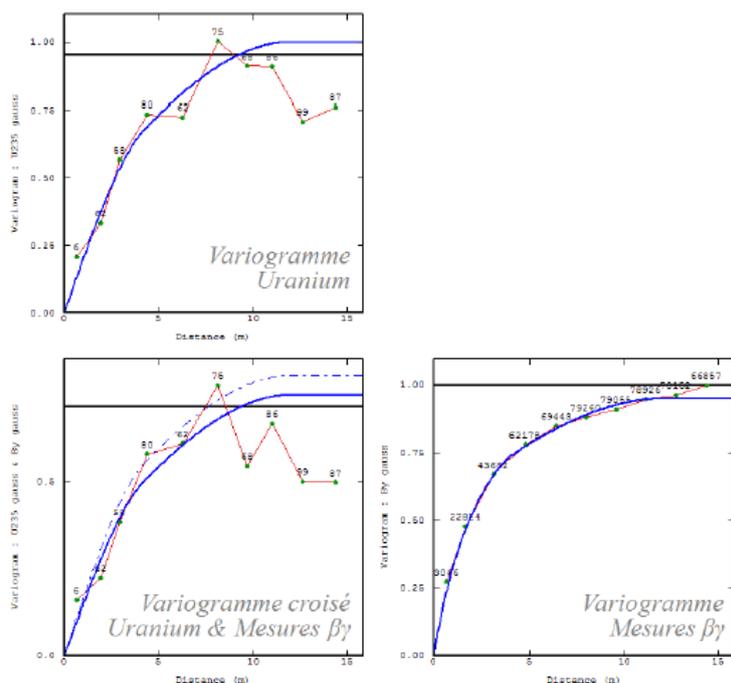


Figure 14 : Variogrammes expérimentaux (en rouge, avec nombre de paires de points) simples et croisés des activités massiques en uranium et des mesures surfaciques du rayonnement $\beta\gamma$ (après transformation gaussienne) du béton d'anciennes installations nucléaires et modèles ajustés (bleu) (Desnoyers, 2010).

La corrélation spatiale peut être calculée et modélisée entre une variable principale et une variable secondaire, voire entre une variable principale et plusieurs variables secondaires sans qu'il y ait de limitation théorique à leur nombre. En pratique, le nombre de variables secondaires est limité à celles qui enrichissent le plus la variable principale, en laissant les autres de côté pour limiter les lourdeurs calculatoires. Comme cela a été évoqué précédemment, plusieurs variables secondaires peuvent également être regroupées par l'intermédiaire de méthodes statistiques multivariées (régression linéaire multiple, ACP).

4.4. Les méthodes géostatistiques pour valoriser les données indirectes

Les modèles de variogrammes simples et de variogrammes croisés sont ensuite utilisés pour modéliser la variable d'intérêt sur l'ensemble du domaine d'étude. Comme dans le cas monovarié, plusieurs méthodes sont disponibles, dont le choix dépend du problème posé.

4.4.1. Le cokrigage

Le **cokrigage** est la méthode la plus courante de cartographie dans le cas multivarié. C'est une technique qui, comme le krigeage, permet de calculer le meilleur estimateur linéaire non biaisé en tout point x_0 de la variable principale Z sous la forme d'une combinaison linéaire pondérée des données directes et indirectes :

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_Z^i Z(x_i) + \sum_{j=1}^m \lambda_Y^j Y(x_j)$$

où $Z^*(x_0)$ est l'estimateur de Z au point de coordonnées x_0 , et $Z(x_i)$ et $Y(x_j)$ sont les valeurs mesurées des variables principale Z et secondaire Y .

Le cokrigage permet dans le même temps de calculer un estimateur de la variable secondaire Y en tout point x_0 du domaine d'étude.

*Il existe deux types de cokrigage. Le cokrigage à moyenne connue (**cokrigage simple**), basé sur des modèles de covariances plus généraux que les modèles de variogrammes croisés, présente certains avantages par rapport au cokrigage à moyenne inconnue (**cokrigage ordinaire**) :*

- *Il n'est pas nécessaire de disposer des deux types d'information, principale et secondaire, pour calculer un estimateur.*
- *Dans certaines configurations symétriques des données, les contraintes sur les pondérations empêchent ce cokrigage de tenir compte de l'information secondaire.*

Le bénéfice de l'intégration par cokrigage de données indirectes corrélées spatialement avec les données directes de la variable principale est visible sur plusieurs exemples tirés de la littérature sur le sujet. Les cartes d'activités massiques en uranium d'anciennes installations nucléaires établies par (Desnoyers, 2010) par cokrigage (dans les modèles de variogrammes simples et croisés avec les mesures surfaciques de rayonnement $\beta\gamma$ présentés à la Figure 14) montrent de plus faibles variances de krigeage et une plus grande précision dans la répartition spatiale de la pollution que celles issues d'un simple krigeage.

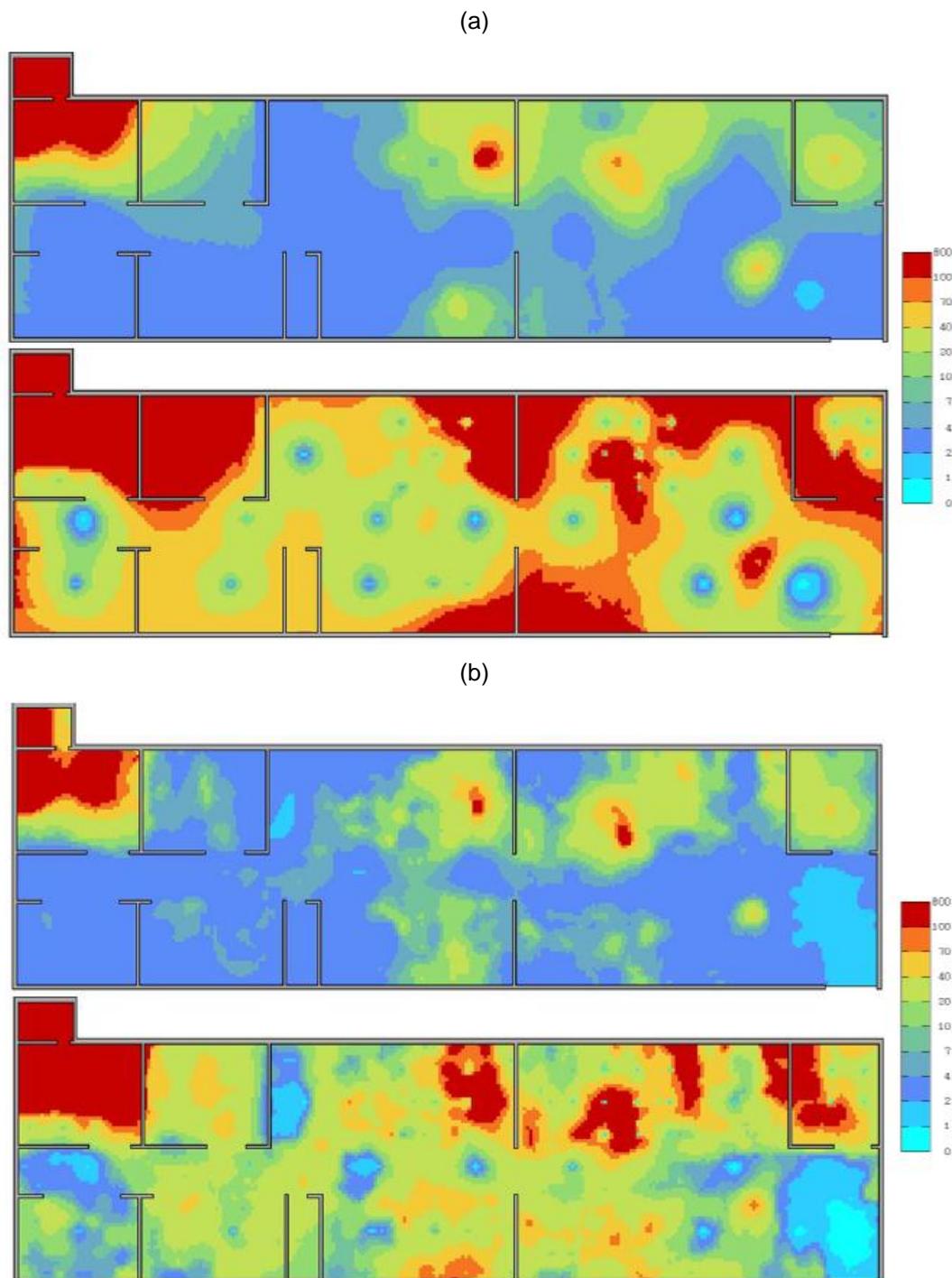


Figure 15 : Comparaison des cartes obtenues par krigeage et cokrigage des activités massiques en uranium. (a) estimation par krigeage (haut) et largeur de l'intervalle de confiance à 95% associé à l'estimation (bas). (b) estimation par cokrigage (haut) avec des mesures surfaciques de rayonnement $\beta\gamma$ pour information secondaire, et largeur de l'intervalle de confiance à 95% associé (bas) (Desnoyers, 2010).

L'avantage du cokrigage par rapport au krigeage est également mis en valeur sur le site d'une ancienne cokerie par (Jeanne, 2001). Un ensemble d'échantillons de remblais a fait l'objet

d'analyses de laboratoire pour mesurer les concentrations en hydrocarbures aromatiques polycycliques. La présence de goudron dans les échantillons a été systématiquement mentionnée par l'opérateur de terrain. La variable principale est la concentration en benzo(a)pyrène (Bap, substance reconnue comme cancérogène). Elle a d'un part été estimée par krigeage ordinaire, d'autre part par cokrigeage ordinaire avec pour information auxiliaire ou bien la somme des concentrations en benzo(b)fluroanthène (Bbf) et benzo(k)fluroanthène (Bkf), ou bien la variable catégorique « présence/absence de goudron ». Pour comparer les trois méthodes, le jeu de données initial a été divisé en deux parties, l'une servant de test de validation des estimations obtenues avec l'autre. Le nuage de corrélation entre données réelles et valeurs estimées a été tracé, et l'erreur quadratique moyenne a été calculée pour chacune des trois méthodes (Figure 16).

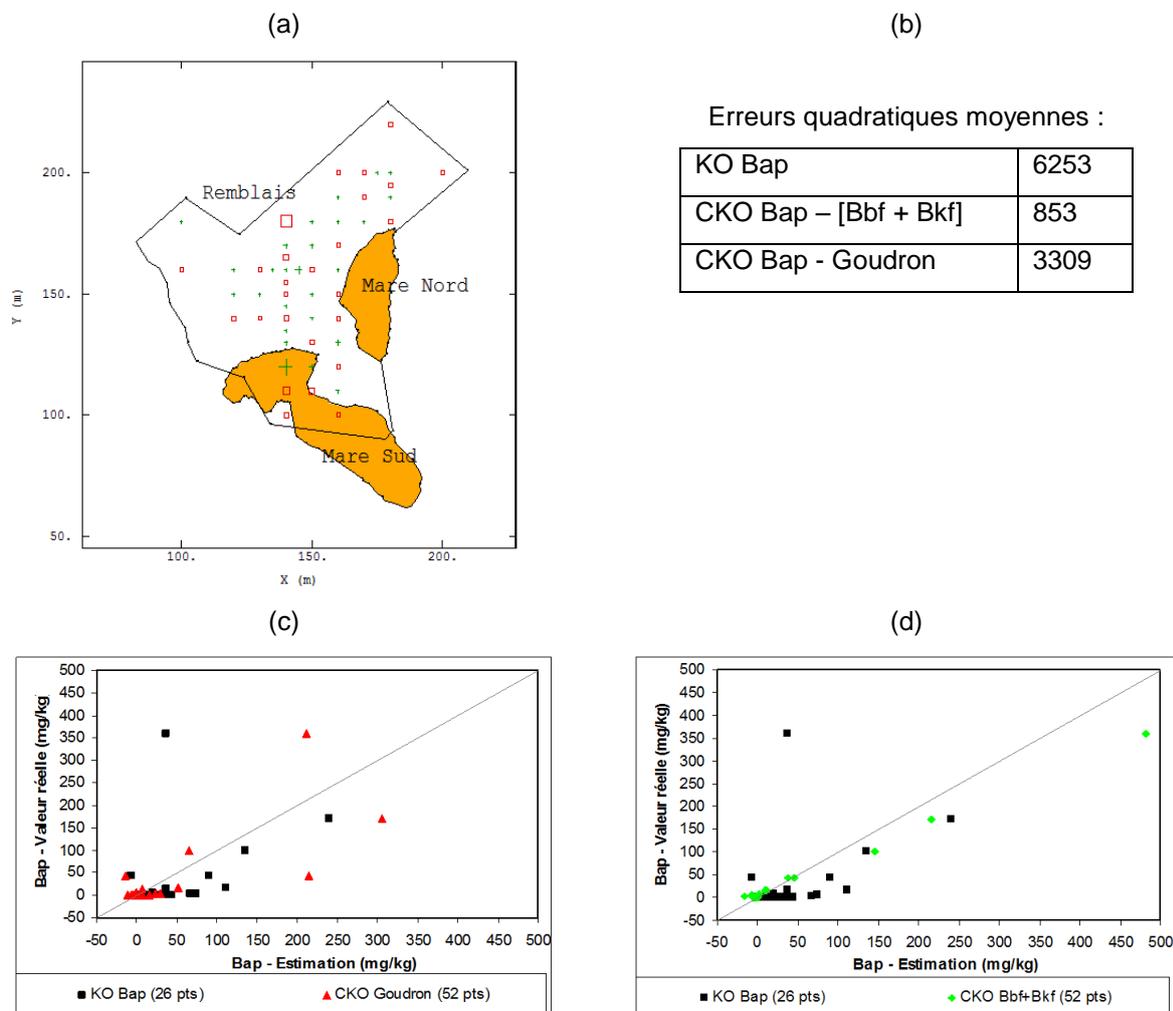


Figure 16 : Comparaison du krigeage et du cokrigeage de concentrations en Bap avec la somme des concentrations Bbf + Bkf ou bien la présence/absence de goudron pour variable auxiliaire. (a) localisation des données d'estimation (rouge) et de validation (vert). (b) erreurs quadratiques moyennes entre données de validation et valeurs estimées. (c) nuages de corrélation entre données de validation et valeurs estimées par krigeage ou cokrigeage avec présence/absence de goudron pour variable auxiliaire. (d) nuages de corrélation entre données de validation et valeurs estimées par krigeage ou cokrigeage avec Bbf+Bkf pour variable auxiliaire (Jeannee, 2001).

On constate alors que l'erreur quadratique moyenne du cokrigeage est ici plus faible que celle du krigeage (6253). Elle est nettement plus faible (853) lorsque la variable auxiliaire est constituée de valeurs de laboratoire Bbf+Bkf. Il est de plus intéressant de souligner qu'elle est réduite de moitié (3309) avec l'emploi de l'information qualitative « présence/absence de goudron » qui ne nécessite aucun coût supplémentaire en termes analytiques.

De la même façon, (Wu, Norvell, & Welch, 2006) utilisent le cokrigeage pour estimer la concentration en Zn biodisponible du sol d'une région du Nord Dakota (USA), avec le pH et la concentration en carbone organique total pour variables secondaires. L'intérêt du cokrigeage par rapport au krigeage est là encore démontré en séparant le jeu de données en deux pour qu'une partie serve de validation

aux valeurs estimées avec les autres : les erreurs quadratiques moyennes apparaissent plus faibles avec le cokrigeage.

4.4.2. Les variantes du cokrigeage

Le **cokrigeage colocalisé** constitue une variante du cokrigeage « classique » lorsque les données renseignant la variable secondaire sont nettement plus nombreuses que celles de la variable principale. Le système de cokrigeage « classique » devient dans ce cas difficile à résoudre (les données secondaires proches sont davantage corrélées que les données primaires, et les données secondaires colocalisées aux données primaires ou très proches masquent l'influence de données secondaires plus éloignées). Le cokrigeage colocalisé consiste à ne retenir que les données secondaires présentes aux mêmes points que les données de la variable principale, ce qui simplifie et accélère les calculs tout en évitant les problèmes évoqués ci-dessus ; mais avec l'inconvénient que les données secondaires en dehors des points renseignés par la variable principale ne sont pas utilisées (perte d'information).

Une autre méthode, appelée **krigeage en strates** par (Goovaerts, 1997), est utilisée lorsque le domaine d'étude peut être divisé en régions où les données de la variable principale constituent une population statistiquement homogène. La variable secondaire permettant de définir les régions (strates) est souvent une variable catégorique (ex. lithologie, usage du sol) ; elle peut être également formée de mesures géophysiques. La variable principale est alors estimée par krigeage, de manière indépendante dans chacune des strates.

D'autres techniques, telles que le **krigeage simple à moyenne locale variable** ou bien encore **krigeage avec dérive externe** (Goovaerts, 1997), peuvent être mises en œuvre lorsque la dérive de la variable principale peut être déduite d'une variable secondaire (par une fonction linéaire par exemple). Le krigeage simple à moyenne locale variable a ainsi été testé par (Saito, McKenna, & Goovaerts, 2005) sur un cas synthétique où il est supposé que des mesures géophysiques menées à large échelle (détecteurs montés sur véhicule ou hélicoptère) peuvent constituer une information secondaire enrichissant la variable principale formée des mesures ponctuelles de détection d'objets explosifs (détecteurs à main).

4.4.3. Les co-simulations et autres méthodes d'estimation non linéaires

Les méthodes de cokrigeage présentées ci-dessus ne sont pas adaptées aux problèmes d'estimation non linéaire qui sont pourtant fréquemment rencontrés dans le domaine des sites et sols pollués. Il est en effet généralement nécessaire, non pas de rechercher le meilleur estimateur en un point du domaine d'étude qui minimise la variance de l'erreur d'estimation, mais de réduire les risques d'erreur de classification par rapport à un seuil de référence. Les techniques recherchées sont donc celles qui permettent en chaque point x du domaine de calculer la probabilité que la variable Z soit supérieure ou égale au seuil de référence S : $Prob\{Z(x)\} \geq S$, ou d'une manière plus générale lorsque plusieurs polluants sont en jeu, la probabilité conjointe que plusieurs variables dépassent leur seuil de référence.

Une solution possible consiste à générer un ensemble de simulations équiprobables de la variable Z , conditionnées par les données disponibles, tel que cela a été présenté au paragraphe 3.2.3.2 à la page 17. De la même façon dans le cas multivariable, il est possible de générer un ensemble de **co-simulations** de la variable principale et de sa ou ses variable(s) secondaire(s). Les co-simulations font appel aux fonctions variogrammes croisés ajustées aux données, tel que décrit au paragraphe 4.3. Ces techniques sont par exemple utilisées dans la démarche Repérage (H Demougeot-Renard, Haouche-Belkessam, & Deny, 2008) sur un site contaminé aux métaux lourds, dont les concentrations ont été mesurées dans une première phase au laboratoire, puis dans des phases itératives ultérieures à l'aide d'un appareil portable à fluorescence de rayon X (XRF). La probabilité de dépassement conjoint des seuils de référence par les concentrations en Cu, Ni, Pb et Zn est calculée à la fin de chaque phase de reconnaissance à partir de co-simulations des concentrations de ces métaux mesurées ou bien au laboratoire ou bien sur site par XRF. Les variables sont co-simulées en donnant la priorité aux variables les mieux corrélées. Ainsi, les concentrations en Zn de laboratoire sont co-simulées avec les concentrations en Zn mesurées au XRF ; puis les concentrations en Pb de laboratoire sont co-simulées avec les concentrations en Zn de laboratoire, etc.

D'autres techniques existent pour calculer des probabilités de dépassement de seuil en intégrant des informations secondaires. De la même manière qu'il est possible d'appliquer un krigeage à une variable indicatrice dans le cas univariable (krigeage d'indicatrice), il est possible de calculer un **cokrigeage de plusieurs variables indicatrices**. Ces techniques présentent cependant l'inconvénient de ne pas pouvoir fournir une estimation globale (ex. volume ou tonnage de sol contaminé) ou appliquer une fonction de transfert (ex. fonction-coût, indice de risque) pour un résultat directement utilisable pour l'aide à la décision.

4.5. L'application de la géostatistique aux mesures géophysiques

Les mesures géophysiques exploitent des champs naturels ou provoqués, soit la propagation des ondes pour caractériser les terrains par leurs propriétés physiques : conductivité électrique, constante diélectrique, masse volumique, susceptibilité magnétique, etc. Chaque méthode géophysique dispose donc d'un principe de fonctionnement propre et de conditions d'applications spécifiques. Le nombre de méthodes géophysiques et surtout de leurs différentes variantes est important. Ainsi, sont recensées pas moins de 74 méthodes géophysiques dans les fiches de l'AGAP Qualité³.

Les méthodes géophysiques sont employées majoritairement pour la recherche et l'étude des gisements (90 %) et dans une moindre mesure, le génie civil, l'archéologie et l'environnement.

Une abondante littérature décrivant les méthodes et applications des diverses méthodes géophysiques est disponible en langue française et anglaise (notamment Mari, 1998 ; Milson, 2003, Denis et Martinaud, 2003).

RECORD a examiné, dans le cadre de deux projets (Goury, 2007 ; Avocat & Boulanger, 2007), l'applicabilité des méthodes géophysiques à la caractérisation de pollutions organochlorées et hydrocarbonées.

Les méthodes géophysiques les plus rencontrées lors des reconnaissances sur sites pollués sont décrites aux paragraphes suivants, en insistant sur leurs applications et la possibilité de valorisation géostatistique.

4.5.1. Méthodes électriques

Principe

La méthode électrique consiste à injecter un courant électrique dans le sol à l'aide d'électrodes et mesurer la différence de potentiel sur une autre paire d'électrodes. Par ce biais, une résistivité électrique ($\Omega.m$ ou $Ohm.m$) des sols est mesurée. Il est possible de travailler en sondage qui consiste à donner la répartition verticale de la résistivité du sol en un point précis à partir de la surface mais aussi en profilages électriques à l'aide d'un système multi-électrodes qui permet d'obtenir des sections ou images 2D ou 3D traduisant la distribution de la résistivité électrique dans le sol.

La profondeur d'investigation et la résolution des méthodes électriques sont fonction de l'espacement maximal entre les électrodes. Plus cet espacement est grand, plus la profondeur d'investigation est grande et la résolution plus faible. Les méthodes électriques sont moins perturbées en présence de conducteurs mais nécessitent de la place et de planter des électrodes.

Application

Les méthodes électriques sont principalement utilisées pour la réalisation de modèles géologiques (exploitation de matériaux, failles ...), recherche d'aquifère, localisation d'hétérogénéités (poches d'argiles, zones karstifiées comblées ...) mais aussi pour la caractérisation de polluants présentant une très grande ou très faible résistivité (voir figures suivantes).

Valorisation géostatistique

Les données électriques, une fois inversées peuvent être aisément traitées par géostatistique en 2D et 3D. C'est le cas des relevés réalisés récemment par le BRGM et la société américaine AESTUS (McDonald & Halihan (2003)). L'effet visuel de telles représentations est un bon facteur de communication.

Il ne faut cependant pas oublier que ce n'est pas la vraie variable géophysique qui est traitée par géostatistique mais les résultats de son inversion mathématique. Celle-ci repose sur ses propres hypothèses et symétries ; en conséquence, il faut rester prudent sur les conclusions de l'étude variographique. La géostatistique permet alors de réaliser une interpolation mathématiquement robuste des données inversées notamment en tenant compte de l'anisotropie du phénomène.

A titre d'exemple, sont présentés les résultats de campagnes de mesures électriques réalisées par la société américaine AESTUS et krigés en 3D et 2D. L'apport de la méthode géostatistique comme interpolation des données inversées a montré que les panaches de pollution du site HKI Hobart ne sont pas vraiment ronds et tendent à se déplacer sous forme de "blobs" ou lentilles.

³ AGAP Qualité est une association créée en 1992 par quatre organismes d'études géophysiques de subsurface : le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), CGGVERITAS, la CPGF (Compagnie de Prospection Géophysique Française) et le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées).

Le traitement géostatistique 3D est alors déterminant pour positionner les futurs puits de pompage du site et évaluer l'efficacité des existants. Il apparaît ainsi que les vieux puits de pompage du site s'avèrent désormais mal positionnés et pourraient donner une vision faussée des solvants présents dans les sols.

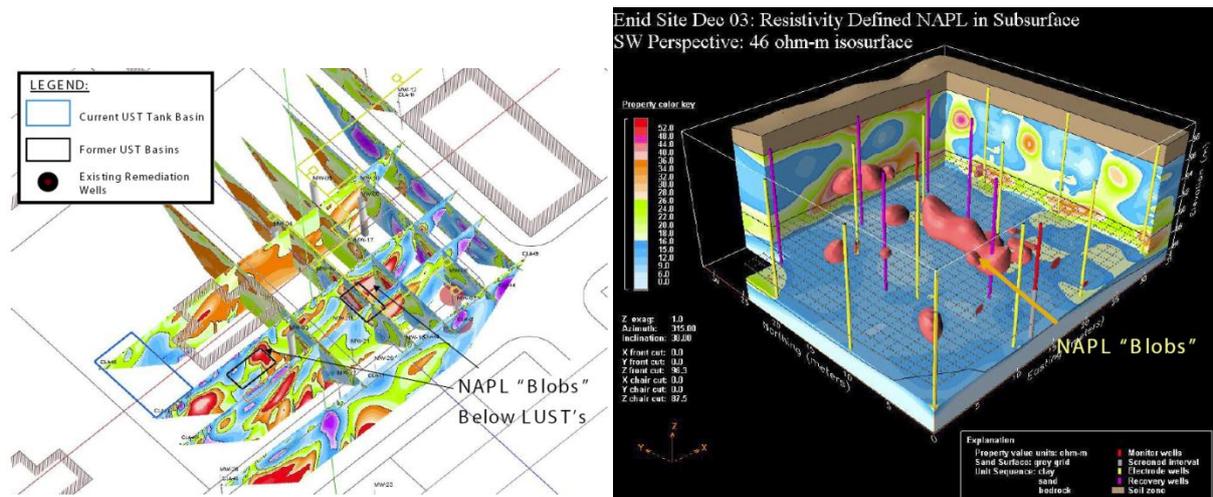


Figure 17 : Fence diagram showing Red NAPL blobs and 3D isosurface, ENID site, 2003 campaign, Innovative High Resolution Electrical Resistivity Imaging (ERI), McDonald & Halihan (2003).

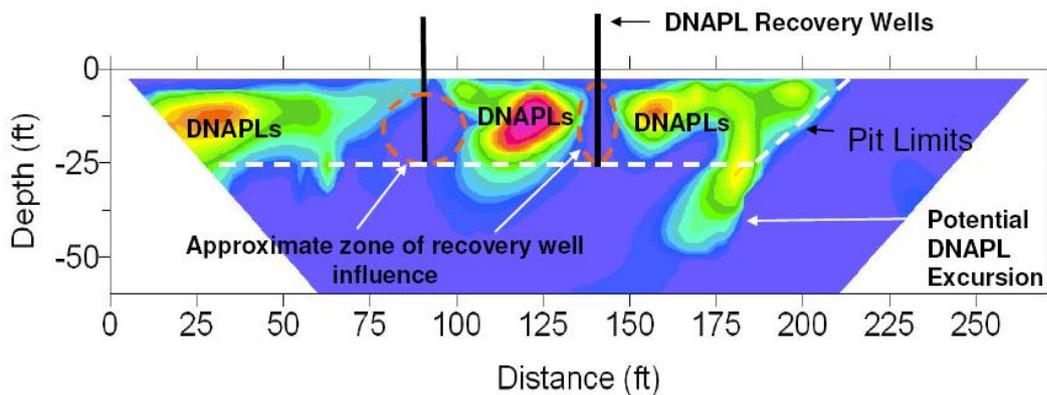


Figure 18 : Red DNAPL 2D blobs on a site trench. "At the time the image was taken, wells were "clean" for 2 years", Innovative High Resolution Electrical Resistivity Imaging (ERI), McDonald & Halihan (2003).

Sur un ancien site industriel Lorrain, (Garcia & Froidevaux, 1996) ont utilisé l'ensemble des données collectées, dont des mesures géophysiques, pour modéliser la probabilité de dépassement du seuil 200 ppm par les concentrations en hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) du sol, par les étapes suivantes :

1. Le domaine d'étude est modélisé à l'aide de 553 données de topographie et des coupes lithologiques de 11 sondages (estimations par krigeage).
2. Les types de sol sont modélisés en générant plusieurs simulations des 3 sols identifiés, conditionnés par les logs de forages et les mesures géophysiques (résistivité électrique). Les statistiques conditionnelles des concentrations en HAP ont en effet montré que ces valeurs étaient systématiquement inférieures à 100 ppm pour les sols de type 1 et 3 (sols argileux et dépôts de cendres). Seuls les sols de type 2 (déchets et remblais) pouvaient donc présenter des concentrations en HAP supérieures au seuil de référence de 200 ppm.
3. Les probabilités de dépassement du seuil de référence ont été calculées par krigeage d'indicateur dans le modèle de sol de type 2 seulement, les sols de type 1 et 3 étant considérés comme « sains ».

4.5.2.Méthodes magnétiques

Principe

Les méthodes magnétiques (mesures sur le champ magnétique naturel en Tesla ou Gammas) sont utilisées pour la détection des matériaux à contraste de susceptibilité magnétique et/ou d'aimantations rémanentes.

Application

Ces méthodes sont principalement utilisées en déminage (Munsch, 2011), archéologie ou prospection de gisement. La très grande sensibilité de la méthode aux objets ferreux enfouis ou aériens et aux lignes électriques interdit habituellement l'utilisation en milieu urbain.

Les méthodes magnétiques ne semblent pas adaptées à l'étude des pollutions (Avocat & Boulanger, 2007). Toutefois certaines zones de décharges avec des brulis ou présence de scories peuvent générer des anomalies magnétiques utiles à la mise en évidence de pollutions d'où l'utilisation de cette méthode par Antea Group.

Valorisation géostatistique

Usuellement, les relevés magnétiques entre lignes de mesures sont :

- interpolés par des algorithmes de type minimum courbure ou spline. Privilégiant un traitement rapide de jeux de données importants, de leur propre aveu, les opérateurs recherchent plutôt des zones d'anomalies franches ou des linéaments clairs qu'une interpolation juste ;
- corrigés et filtrés abondamment (corrections diverses, Hilbert, déconvolution, ondelettes) ;
- généralement représentées en « shaded relief » sous différents angles d'illumination de manière à mettre en valeur les structures recherchées.

Les deux figures suivantes montrent le résultat de tels traitements.

La forme et l'intensité des anomalies en nT (nano tesla) pour une même cible varient dans l'espace. Du point de vue géostatistique, le signal n'est pas vraiment stationnaire et présente alors de très fortes anisotropies tant géométriques que zonales. La géostatistique peut alors être utilisée mais en prenant en compte les fortes anisotropies locales (Hansen, 1993 ; Magneron et al, 2008).

Ces techniques sont encore peu diffusées auprès des bureaux d'étude.

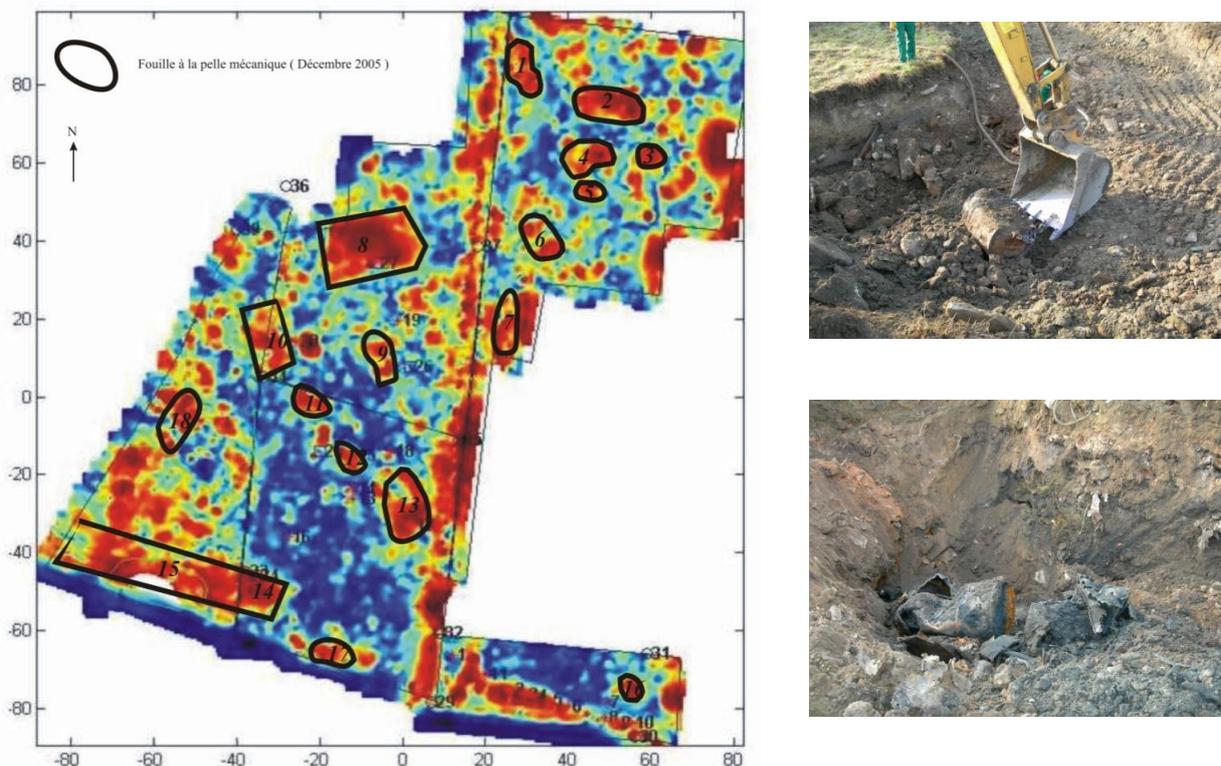


Figure 19 : Cartographie géomagnétique du site Bostik de Ribécourt et forages validant la méthode (EOST & Antea Group, 2006).

4.5.3.Méthodes électromagnétiques

Principe

Les méthodes électromagnétiques consistent à mesurer la conductivité électrique ($S.m^{-1}$ ou siemens par mètre), la résistivité électrique ($\Omega.m$ ou $Ohm.m$) et éventuellement la susceptibilité magnétique (χ ou χ_m) des sols sous-jacents.

Méthode Slingram

Les appareils les plus connus utilisent la méthode Slingram : une bobine émettrice parcourue par un courant alternatif génère un champ magnétique primaire. Celui-ci engendre dans le sol des courants de Foucault dont la distribution en volume dépend des hétérogénéités du sous-sol, qui créent à leur tour un champ magnétique secondaire, de fréquence identique au champ primaire. La somme des champs primaire et secondaire est mesurée par une bobine réceptrice dont la distance à l'émettrice est petite. Le rapport du champ secondaire en quadrature (noté Q) au champ primaire est proportionnel à la conductivité électrique apparente (σ_{app}), en mS/m.

La profondeur d'investigation (définie comme étant la capacité à être sensible à une couche conductrice ou à un volume conducteur) ne dépend que de la distance entre l'émetteur et le récepteur et est indépendante de la fréquence du signal émis (au contraire d'autres méthodes électromagnétiques caractérisées par l'effet de peau, c'est-à-dire l'atténuation du signal électromagnétique avec la profondeur, et la croissance de la profondeur d'investigation avec la période de l'onde). Les données acquises sont représentatives d'un volume de sol allant de la surface à une profondeur d'investigation qui est de l'ordre de 1,5 fois l'écartement inter-bobines, soit environ 6 m pour un EM31 fabriqué par GEONICS. La forme des anomalies détectées avec un EM31 dépend de la profondeur, de la géométrie et de l'orientation des cibles (présence de métal, lixiviats, chlorures, anomalies structurales, failles) par rapport à l'appareil. A titre d'exemple, une cible produit en général une anomalie de phase positive comprise entre deux anomalies négatives.

Méthode TDEM (« time domain electromagnetics »).

Un champ magnétique très intense est émis de manière à créer par induction des courants dans les objets métalliques enfouis ; l'évolution des courants induits est ensuite mesurée par le biais des champs réémis par l'objet excité. Le détecteur analyse la réponse du sol dans le domaine temps ainsi qu'en amplitude de manière à soustraire les bruits de fond du sol et d'évaluer la profondeur de l'objet. Ce type d'appareillage produit à l'aplomb des objets métalliques des anomalies très marquées exprimées en mV. A titre indicatif, par rapport à un terrain naturel ayant servi comme zéro de calibration, un fût à 2 mètres de profondeur produit une anomalie de l'ordre de 100 mV et une canalisation à 0,50 m de profondeur peut produire une anomalie de plus de 1 000 mV. Certains appareils à spires tel l'EM61 sont dévolus à la détection de métal mais il en existe d'autres donnant accès à la conductivité électrique des sols et pouvant apporter les mêmes informations que les méthodes slingram à des profondeurs variables.

Application

Les méthodes électromagnétiques sont toutes parasitées par les conducteurs et les émissions électromagnétiques et de fait sont utiles pour la détection de pollutions acides ou ayant un contraste suffisant avec les sols encaissants. Elles peuvent être utilisées pour la détection des objets métalliques enfouis.

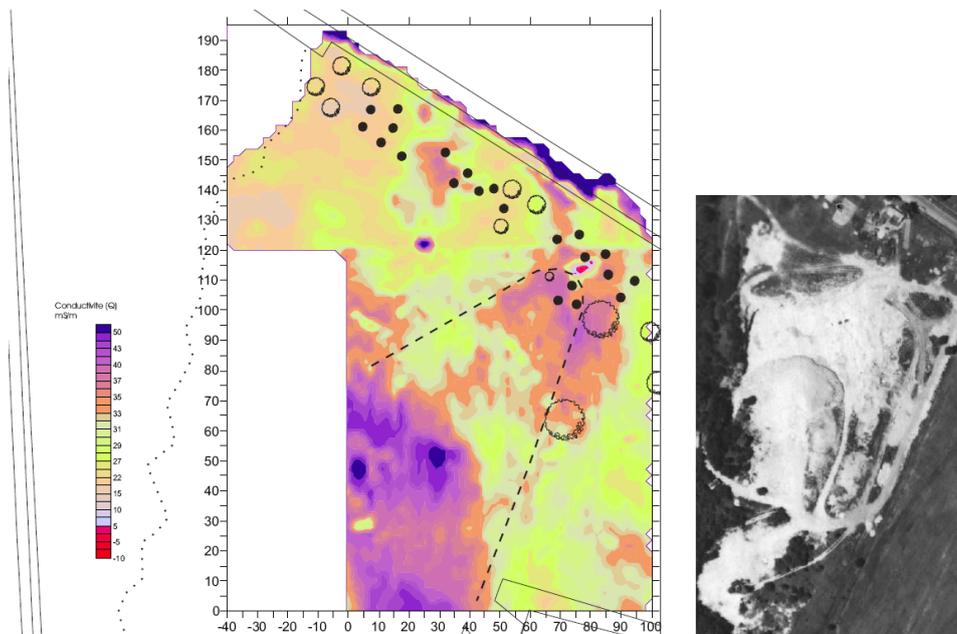


Figure 20 : Délimitation du périmètre d'une ancienne décharge par mesures électromagnétiques EM31 (Dondaine et Belbèze, 2004).

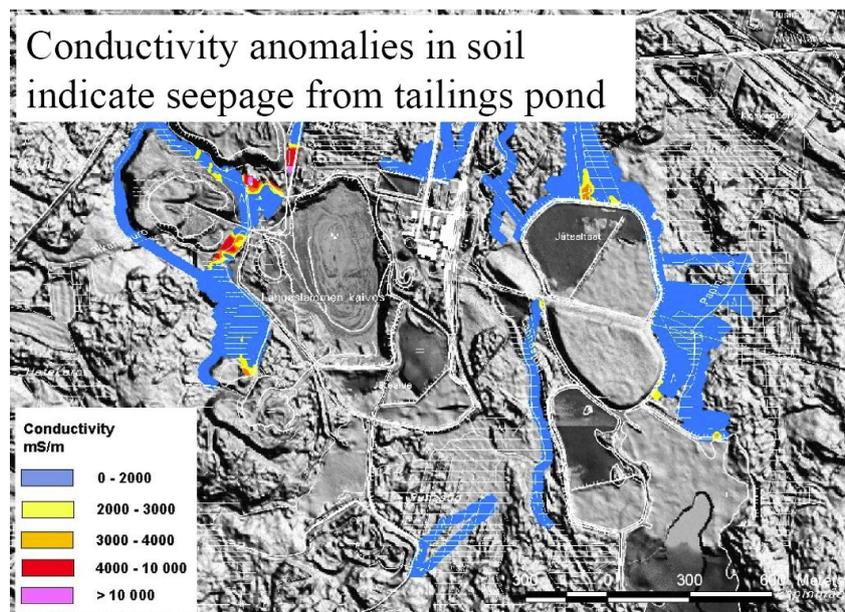


Figure 21 : Mesure des anomalies de conductivité au voisinage de lagunes indiquant les sols impactés et voies de fuite (Kuosmanen, 2002).

La recherche des extensions latérales des pollutions est plutôt rare. A ce titre, les travaux menés par R. Guérin (UMR 7619 Sisyphé) et P. Begassat (ADEME) sur la friche industrielle de Mortagne du Nord (59) sont exemplaires. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'un programme d'étude des pollutions en métaux lourds piloté par le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Service SRAE, au cours des années 1995 à 1999 puis par l'ADEME pour 2001-2003.

Sur cette friche ont été conduits des relevés électriques et électromagnétiques dont les interprétations ont été corrélées avec les tranchées exploratoires.

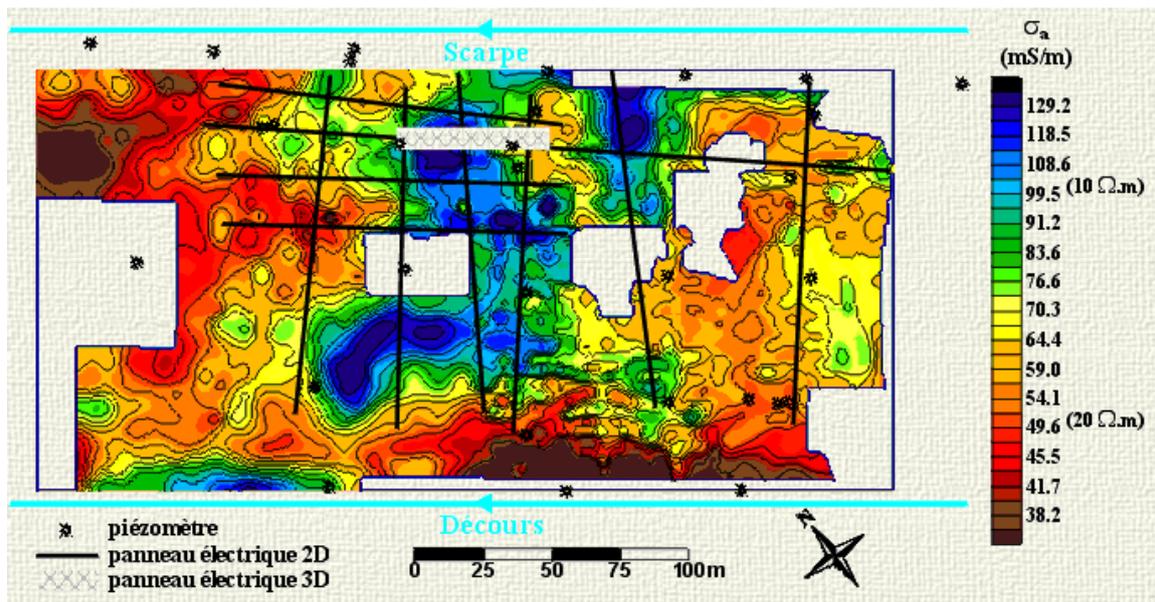


Figure 22 : Friche industrielle de Mortagne du Nord (Guérin et al, 2002) : carte de conductivité électrique apparente EM31 avec une zone bleu/vert relativement conductrice qui correspond à une zone baignée par de l'eau très minéralisée et une zone en rouge/marron relativement résistante (alluvion ou zone moins minéralisée).

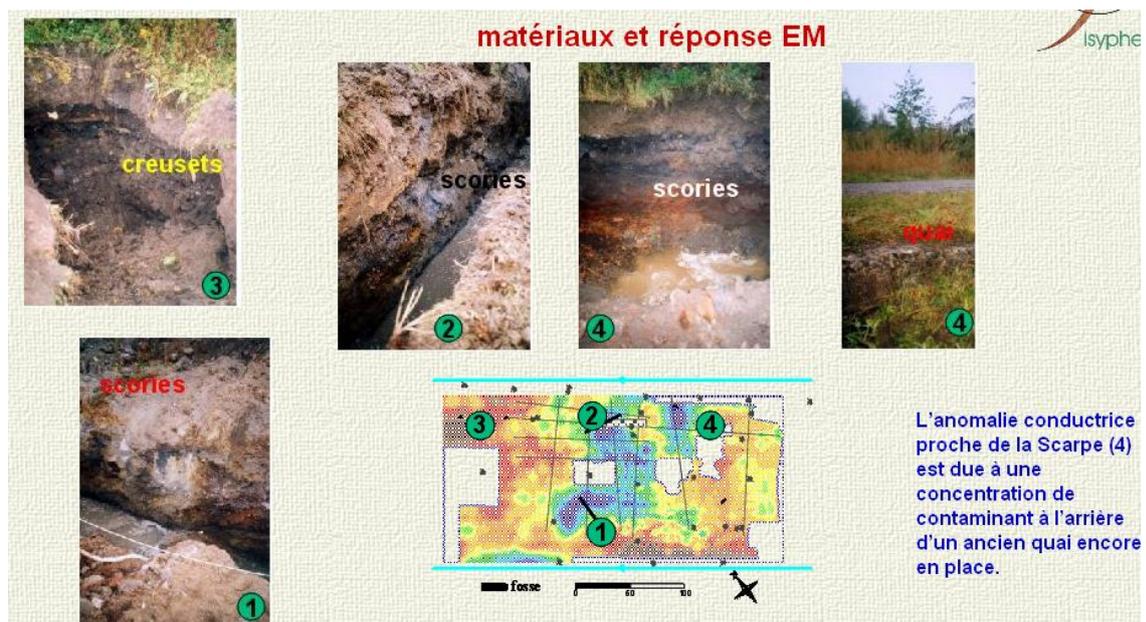


Figure 23 : Friche industrielle de Mortagne du Nord : corrélation entre matériaux de la friche et réponse EM (Guérin et al, 2002).

Les résultats de cette étude sont les suivants :

- Les données obtenues montrent l'intérêt des méthodes géophysiques pour identifier la structure spatiale d'un tel milieu hétérogène et complexe.
- Les prospections à différentes profondeurs et sur une large surface ont permis de localiser les zones d'eau à forte minéralisation et d'identifier les fuites d'eau en direction des deux drains fluviaux.
- Les informations indispensables données par les forages sont complétées par celles fournies par la géophysique qui permettent de les interpoler tout en offrant la possibilité d'atteindre une échelle d'analyse métrique.

Valorisation géostatistique

Les données électromagnétiques sont en général mises en valeur par un traitement géostatistique par krigeage.

Toutefois les données gagneraient à être transformées au préalable de manière à ne pas biaiser l'interprétation. Les écarts d'amplitudes des mesures peuvent, en effet, se révéler considérables et plusieurs modes de traitement peuvent être alors envisagés :

- Une transformation des données par logarithme, anamorphose, indicatrices ou de type « histogram stretching » de manière à redresser la distribution des données et pouvoir calculer un variogramme non perturbé par les très grandes valeurs. Il s'agit de la méthode la plus courante. A titre d'exemple, la figure suivante présente les résultats obtenus dès 1996 par krigeage d'indicatrice de valeurs d'EM34 (Woldt et al, 1998).
- Considérant que, sur de petits spots présentant une très forte réponse, ces dernières méthodes ne sont pas toujours optimales, Antea Group utilise une méthode mise au point en 2002 pour les mines d'or (Rivoirard et al, 2012), qui propose en premier lieu la création d'un indicateur de dépassement de seuil puis l'écrêtage des données selon ce seuil. Les deux variables sont alors cokrigées et recombinaées pour donner une estimation exempte des artefacts de hautes valeurs.
 - Soit Z la variable et c la valeur de coupure souhaitée (déterminée empiriquement avec l'histogramme). Deux variables sont créées $A = \min(Z,c)$ et $B = (Z-c)1_{Z>c}$,
 - On définit $b=E(B)$ et $t = E(1_{Z>c})$,
 - A et $1_{Z>c}$ sont alors co-krigées et estimées,
 - L'estimation de Z est finalement recomposée de la manière suivante : $Z \approx A + b/t 1_{Z>c}$

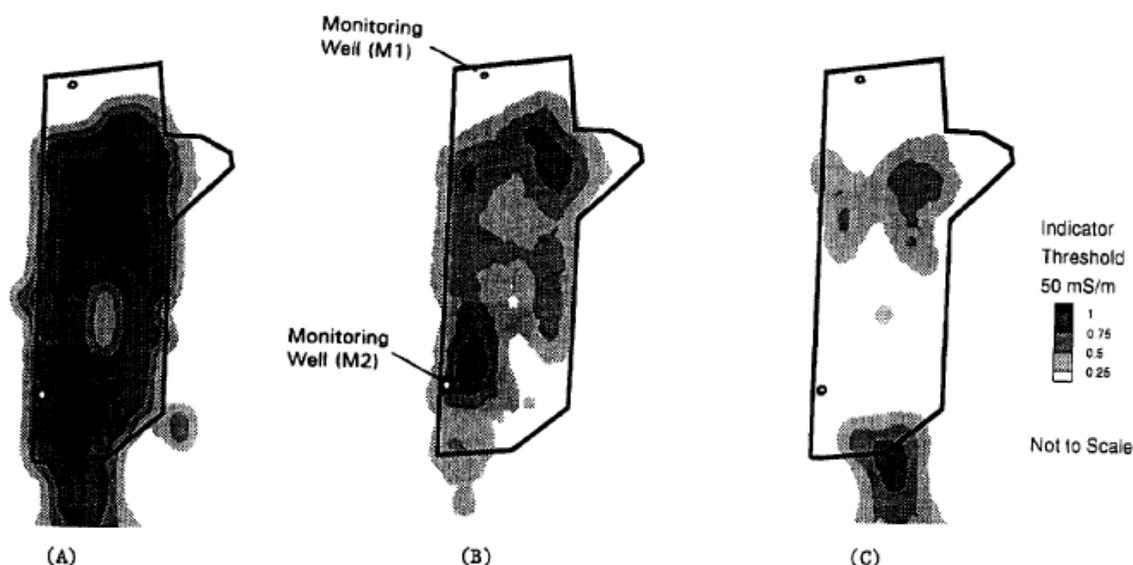


Figure 24 : Cartes de krigeage d'indicatrices pour (a) Zone non saturée, (b) Zone saturée, sable fin et moyen, (c) Zone saturée, Sables et graviers. Characterisation of an unregulated landfill using Surface-Based Geophysics (Woldt et al, 1998).

4.5.4.Méthodes géoradar

Principe

Le radar géophysique ou géoradar émet des impulsions électromagnétiques à une fréquence constante, les réflexions obtenues permettent de convertir les temps en profondeur connaissant la vitesse de propagation de ces réflexions. Les fréquences utilisées sont variables de 50 MHz à 1,5 GHz permettant des profondeurs de pénétration de 30 m à quelques centimètres. En traitement, on présente principalement des profils, mais des traitements plus évolués par tomographie sont possibles.

Application

Cette méthode est principalement employée pour la détection d'objets enfouis en temps réel et avec une grande résolution.

Sur site pollué, le géoradar sert principalement à la détection des servitudes enterrées mais certains polluants comme les hydrocarbures atténuent suffisamment les ondes électromagnétiques pour devenir détectables par radar (Annan, 2001 ; Dondaine & Delcausse, 2003).

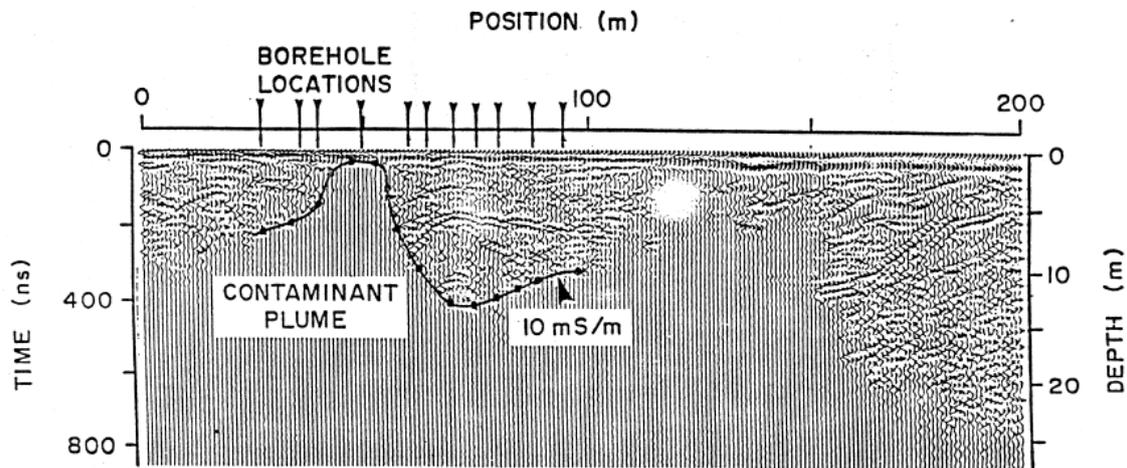


Figure 25 : Détermination d'un profil de pollution par hydrocarbures par examen de l'atténuation des ondes radar (Annan, 2001).

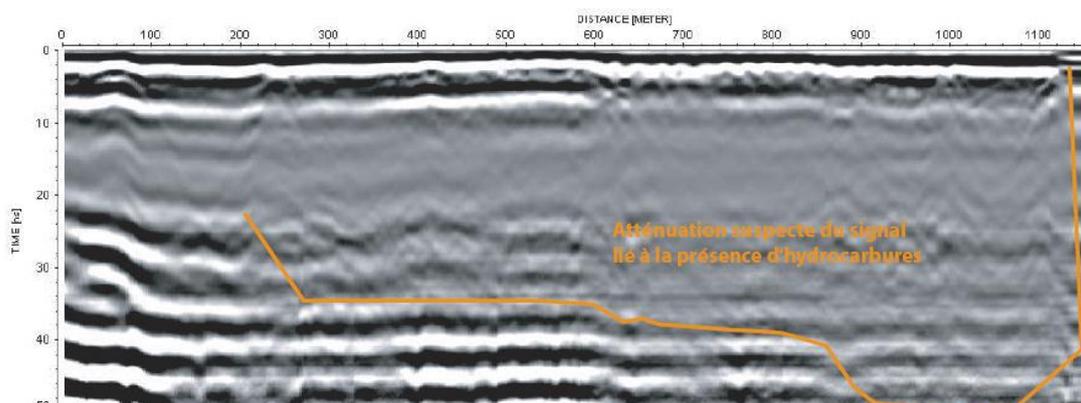


Figure 26 : Profil radar au droit d'une zone ayant abrité des cuves à hydrocarbures (Dondaine & Delcausse, 2003).

Valorisation géostatistique

La géostatistique peut être utilisée comme outil d'interpolation entre profils radar lors de la réalisation des tomographies. Toutefois, c'est une technique qui n'est pas proposée dans les logiciels phares du marché que sont Radan, Gred3D ou Reflexw. Il faut alors se tourner vers des logiciels plus complexes et onéreux comme GPR-SLICE (Goodman, 2008) pour disposer dans un même logiciel d'un module permettant de calculer le variogramme et de kriger les données radar. Il s'agit d'un traitement de données utilisé principalement par les archéologues.

4.5.5.Méthodes micro-gravimétriques

Principe

La micro-gravimétrie est une méthode de prospection géophysique qui mesure le champ de pesanteur terrestre (microgals avec $1 \text{ gal} = 1 \text{ cm/s}^2$) afin de déterminer des anomalies de densité dans le sous-sol. Les levés sont effectués avec des gravimètres.

Application

La micro-gravimétrie est principalement utilisée en recherche de cavités souterraines et pour la prospection de gisements métallifères.

Même si la densité de certains polluants est différente de l'eau ou des sols encaissants, le contraste produit ne semble pas suffisant pour être détecté depuis la surface, limitant ainsi l'application de cette méthode pour la caractérisation de pollutions (Avocat & Boulanger, 2007).

Valorisation géostatistique

Les données gravimétriques présentées sous formes d'iso-contours se prêtent bien à la modélisation géostatistique.

4.5.6.Méthodes sismiques

Principe

Sismique réflexion

La méthode de sismique réflexion consiste à générer une onde acoustique à la surface du sol par un vibreur, un marteau ou des cartouches de dynamite et d'en mesurer numériquement la réponse du sol ou réflexions à partir d'une série de capteurs sismiques ou géophones répartis régulièrement suivant un dispositif en surface. Les réflexions ainsi enregistrées sont causées par des changements de densités et de vitesses de propagation des ondes dans le milieu (m/s) investigués. Les temps enregistrés aller-retour de l'onde sismique permettent alors de remonter jusqu'à la détermination de la profondeur du réflecteur.

Sismique réfraction

Dans le cas d'un milieu composé de deux terrains, les ondes sismiques se réfractent sur la surface du second milieu, caractérisé par une vitesse de propagation des ondes élastiques plus importante. Un levé de sismique réfraction consiste à provoquer une vibration en surface et à enregistrer le temps d'arrivée des ondes réfractées. Le traitement du temps d'arrivée (hodochrones) de l'onde réfractée enregistrée à partir de géophones, permet de déterminer la vitesse de propagation de l'onde réfractée du second milieu, ainsi que sa profondeur.

Application

La méthode de sismique réflexion est utilisée à grande échelle pour l'exploration de pétrole et de gaz. Elle est également utilisée dans les travaux publics et le génie civil mais s'intéresse aux sols profonds (> 10-15 m) et est peu précise en sub-surface. Même si les propriétés acoustiques des polluants sont différentes de l'eau ou des sols encaissants, le contraste produit (de l'ordre de 1 m/s) ne semble pas suffisant pour être détecté depuis la surface (Avocat & Boulanger, 2007).

La sismique réfraction est principalement utilisée pour connaître l'épaisseur des différentes couches reposant sur un terrain plus dur, identifier des contacts géologiques sub-verticaux, calculer la rippabilité de matériaux. Pour la recherche des pollutions, elle permet notamment d'étudier la géométrie de décharges, mais à l'image de la sismique réflexion ne permet pas l'étude des pollutions (Avocat & Boulanger, 2007).

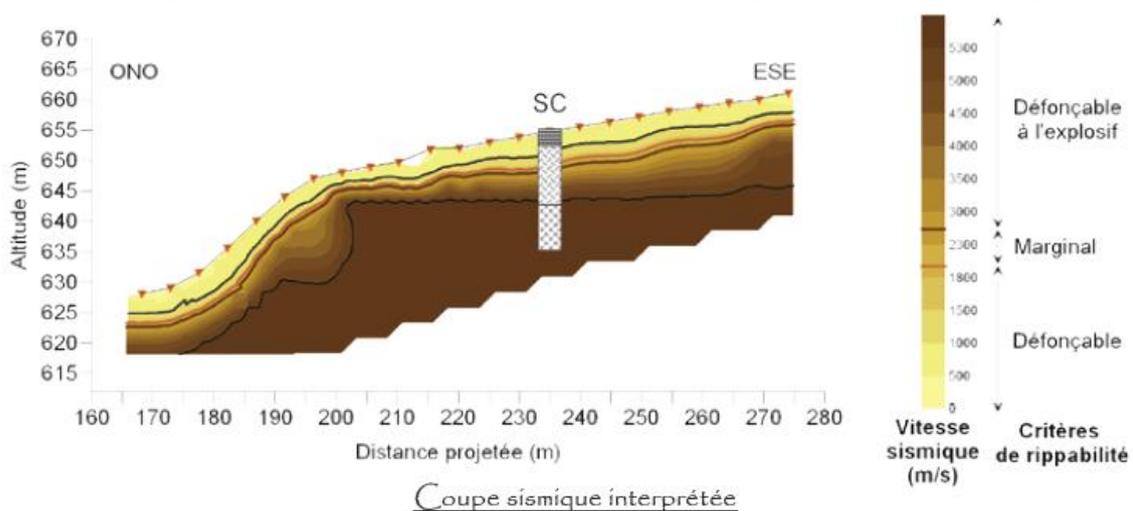


Figure 27 : Etude de la profondeur d'un substratum par sismique réfraction, 2006, IMG Ingénierie.

Valorisation géostatistique

La géostatistique est un outil particulièrement puissant de traitement 3D des champs de vitesse sismique et est devenue la base de création des modèles de gisements et de géologie profonde. Elle permet en outre le contrôle qualité de jeux de donnée sismiques ainsi que le filtrage d'artefacts liés à l'acquisition ou au traitement sismique.

4.5.7. Thermographie infrarouge

Principe et Application

La thermographie infrarouge consiste à mesurer les écarts de températures en degrés entre le polluant et son environnement. Usuellement, ces techniques sont mise en œuvre pour détecter des fuites de procédés sur les usines chimiques et pétrochimiques (écarts de quelques degrés) mais désormais avec une précision de mesure de l'ordre du 100ème de degré, il est possible de rechercher par ce biais l'emprise des sols imprégnés par le produit (Renaud, 2008).

La profondeur atteinte par cette méthode depuis la surface est de l'ordre de 1,20 m et dépend du contraste de température existant et du type de sol du site. Cette approche peut être couplée avec des mesures magnétométriques et des sondages non destructifs pour approcher au mieux le thermomètre de la fuite recherchée.

Valorisation géostatistique

La température est un champ physique continu qui se prête bien à la modélisation géostatistique. Les applications à la disposition des auteurs sont néanmoins confidentielles.

4.5.8. Imagerie hyperspectrale

Principe et Application

Une image hyperspectrale est en réalité toute une série d'images de la même scène, prises dans plusieurs dizaines de longueurs d'onde qui correspondent à autant de « couleurs ». Une telle mesure fournit de nombreuses informations sur les propriétés physiques des objets observés. La spectro-imagerie aéroportée est ainsi d'une grande utilité pour l'étude et la surveillance de l'environnement.

Pour des raisons de coûts d'appareillages, les images hyperspectrales sont peu utilisées pour les sites et sols pollués.

Valorisation géostatistique

La géostatistique ne s'applique pas stricto sensu aux images hyperspectrales qui sont multidimensionnelles et de haute résolution et n'ont donc, a priori, pas besoin d'être interpolées ou compressées par le biais de la géostatistique. Toutefois, celle-ci est appliquée avec succès sur les traitements de réduction de dimension des images par Analyse en Composantes Principales (ACP) ou d'extraction de clusters. Ces techniques vont sélectionner des pixels aux propriétés intéressantes dont la géostatistique va capturer les caractéristiques spatiales.

Quental (2002) présente une étude menée dans le cadre du projet BRGM MINEO (2002) où ont été exploitées mesures chimiques et images hyperspectrales via un traitement géostatistique et ce de la façon suivante :

1. Les données : géochimie multi élémentaire des sols et sédiments (pH, carbone organique, oxydes de fer, minéralogie, métaux lourds) collectée dans 6 aires de référence sur la zone d'étude,
2. Traitement des données géochimiques par Analyse en Composantes Principales (ACP) de manière à réduire les dimensions) et krigeage des composantes principales pour mettre en évidence des anomalies,
3. Les images hyperspectrales sont elles aussi traitées par MNF (minimum noise fraction), ACP, mais aussi Analyse Factorielle des Correspondances (AFC),
4. Les corrélations spatiales sont analysées par le biais de variogrammes croisés,
5. Les données chimiques sont alors interpolées sur chacune des six zones d'étude par co-krigeage.

La conclusion de cette étude est que l'inclusion des données des images hyper spectrales permet de réaliser des cartes de pollutions métalliques plus précises que celles qui seraient obtenues avec les échantillons géochimiques seuls. L'erreur d'estimation décroît. L'auteur ajoute qu'une image hyperspectrale de meilleure qualité aurait pu améliorer encore ce résultat.

4.5.9. Retour d'expérience de la géophysique pour les bureaux d'études en sites et sols pollués

Pour l'Union des Professionnels de la Dépollution des Sites (Hiez, 2011), l'intérêt de la géophysique pour les études et travaux sur sites pollués réside plutôt dans :

- la recherche d'objets / structures enfouies en tant que source potentielle de pollution,
- la sécurisation des interventions (sondages, travaux d'excavation).

L'application de la géophysique aux sols pollués n'est pas exempte de difficultés. Dans sa communication aux journées géostatistiques et sols pollués de l'ADEME, Boulanger (2011) commente deux échecs de la géophysique appliquée aux sols pollués qu'il attribue à deux causes principales :

- Inadéquation des méthodes utilisées (bruit, contraste insuffisant, place insuffisante pour mener les mesures),
- Mauvaise mise en œuvre de la méthode (Non respect de la qualité).

Confirmant cette analyse, Antea Group insiste en outre sur la notion du nécessaire contraste (magnétique, électromagnétique, électrique, gravifique, propagation du son) à établir entre le sol et la pollution recherchée. En effet, les propriétés mesurées ne sont par principe qu'indirectement liées aux teneurs ou indices en polluants potentiels. A la différence des espaces naturels vierges où sont implantés les grands gîtes métallifères, le sol d'un site pollué est un milieu complexe où se superposent diverses couches :

- Un milieu naturel (Terrain naturel plus ou moins propice aux investigations),
- Une couche "archéologique" (anciennes installations, douves...),
- Des structures anthropiques (réseaux, explosifs...),
- Les phénomènes de pollution que l'on recherche.

Chacune de ces couches va intervenir dans l'anomalie visible depuis la surface qu'elle soit magnétique, électromagnétique, électrique, gravifique ou propagation du son. Sur certains sites, il devient très délicat de différencier le qui fait quoi du signal mesuré et d'attribuer l'anomalie à la pollution recherchée. A ceci viennent aussi s'ajouter les difficultés plus classiques liées aux parasites (lignes électriques), difficultés d'accès (encombrement des sites, déploiement des flutes...), localisation, échelle de la mesure, interprétation, modélisation inverse, etc.

Selon les ingénieurs d'Antea Group, même si des difficultés sont rencontrées dans 30 % des cas traités, la géophysique reste un outil d'aide à la décision appréciable notamment pour guider l'implantation des sondages de sol.

Le retour d'expérience d'Antea Group prescrit, outre le strict respect des procédures qualité de mesures et prestations,

- Qu'il y a un intérêt certain à croiser deux méthodes géophysiques différentes sur un même site,
- Que l'étude géophysique doit toujours s'insérer dans un cercle vertueux de diagnostic comprenant un historique de site et une validation par sondage ou tranchée,
- Que la méthodologie d'étude du site doit comprendre une solution de repli en cas d'échec de l'étude géophysique vis à vis des objectifs du client, et rappelle enfin,
- Qu'il est toujours préférable de réaliser une faisabilité des méthodes sur cible connue.

4.6. L'application de la géostatistique aux mesures sur site

Ce chapitre met l'accent sur les apports concrets de la géostatistique pour valoriser les mesures rapides sur site. Comme pour les mesures géophysiques, deux usages de la géostatistique sont envisageables à cet effet : 1) les mesures sur site sont représentatives de la variable d'intérêt principal et les techniques classiques de krigeage permettent alors de les estimer (cartographe) ; 2) les mesures sur site sont perçues comme des informations complémentaires à la variable d'intérêt principal, et sont alors utilisées pour renseigner une variable secondaire en mettant en œuvre les méthodes géostatistiques multi-variables présentées au chapitre 4. Dans tous les cas, la position des mesures sur site peut être optimisée à partir de démarches géostatistiques telles que décrites au §

6.4. A la différence des chapitres 4 et 6 s'attachant aux aspects théoriques et innovants du couplage de la géostatistique et des mesures sur site, ce chapitre présente des retours d'expérience concrets pour quelques types de mesures sur site couramment utilisés.

4.6.1. Les mesures de gaz du sol

Principe et Appareillage

Il est possible de mesurer par le biais de sondages, chambres à recirculation ou sondes « près-du-sol » ou « gaz-du-sol », les teneurs semi-quantitatives dans la phase gazeuse d'un sol en différentes substances toxiques ou explosives (p. ex. hydrogènes sulfurés, cyanures d'hydrogène, composés organiques volatils (COV)). Quelques types d'appareillages couramment employés sont illustrés aux Figure 28 et Figure 29.



Figure 28 : Exemple de dispositif de prélèvement de gaz du sol et de mesure des COV par un détecteur par photo-ionisation (PID) (Delcausse & Belbeze, 2003).



Figure 29 : Exemples d'analyseurs de gaz disponibles dans le commerce (MultiRAE et Dräger Multiwarn).

Un travail important a été mené ces dernières années par les bureaux d'étude pour informatiser la collecte des données de mesures en temps réel. Certains systèmes de mesure sont désormais associés à des GPS avec des possibilités de traitement rapide des données. Des exemples de mise en œuvre de l'outil logiciel FIELDS développé spécifiquement dans cet objectif à partir d'un système d'information géographique avec le soutien de l'US EPA sont présentés aux Figure 30 et Figure 31.



Figure 30 : Exemple de dispositif de mesures de gaz du sol et de cartographie des teneurs mesurées en cyanure d'hydrogène à l'aide de l'outil logiciel FIELDS (Bing Canar, 2008).

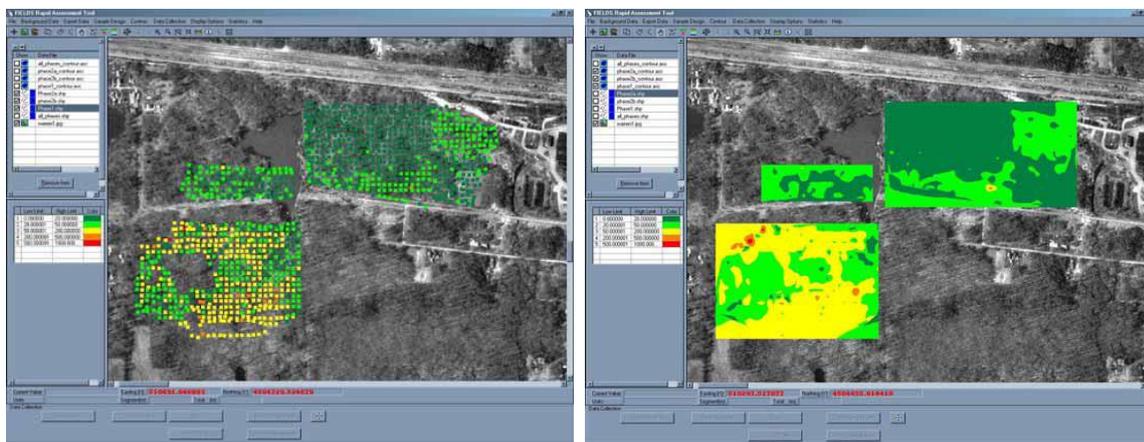


Figure 31 : Warren recycling, H2S emission measurement and mapping (Durno, 2008).

Exemples d'application de la géostatistique

Les techniques géostatistiques classiques peuvent être utilisées pour modéliser un panache de gaz souterrain, qui présente en général une bonne continuité spatiale du fait de la dissémination de la pollution par des mécanismes de diffusion/advection.

Un krigeage (Figure 32) a par exemple été utilisé pour cartographier directement les concentrations en COV issues d'un détecteur par photo-ionisation sur une zone d'aménagement concerté (ZAC) (Delcausse & Belbeze, 2003). Au total 163 mesures au PID des gaz du sol avaient été réalisées entre 1.50 m et 3 m de profondeur selon une maille régulière au moyen d'un système Geoprobe®. De fortes teneurs en COV avaient été mises en évidence par ces mesures (jusqu'à 2000 ppm). La cartographie par krigeage a permis de fournir une estimation de l'extension des spots de polluants, sachant que l'arrêté préfectoral concernant le site définissait des zones « spot solvant » et hot spot » par une valeur minimale au PID de 20 ppm.

L'analyse variographique des données a de plus mis en valeur un plus fort effet de pépite en zone humide, qui serait attribuable à des mesures PID moins précises lorsque la teneur en eau du sol est élevée (mesures PID \pm 50 ppm par temps pluvieux). Cet effet de l'humidité sur la mesure remet en cause la pertinence de la valeur de 20 ppm de l'arrêté préfectoral pour délimiter les périmètres d'influence des zones dites « spot solvant » en dehors des périodes sèches. Notons que cet impact de la teneur en eau est actuellement remis en question dans le cas de travaux de recherche (Atteia, 2012).

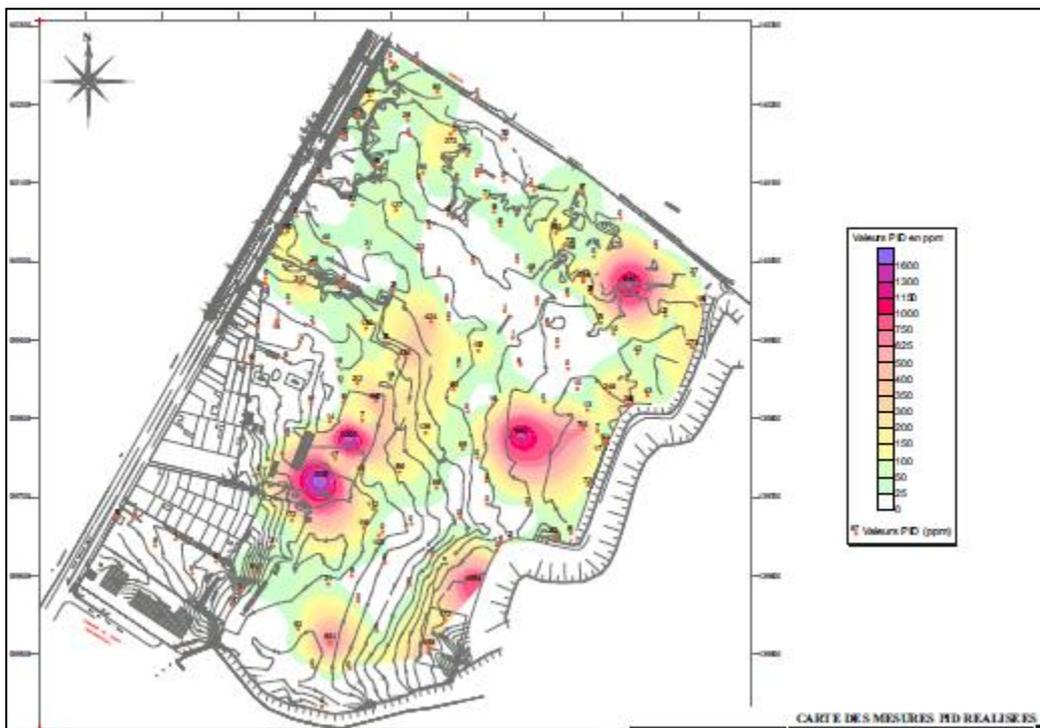
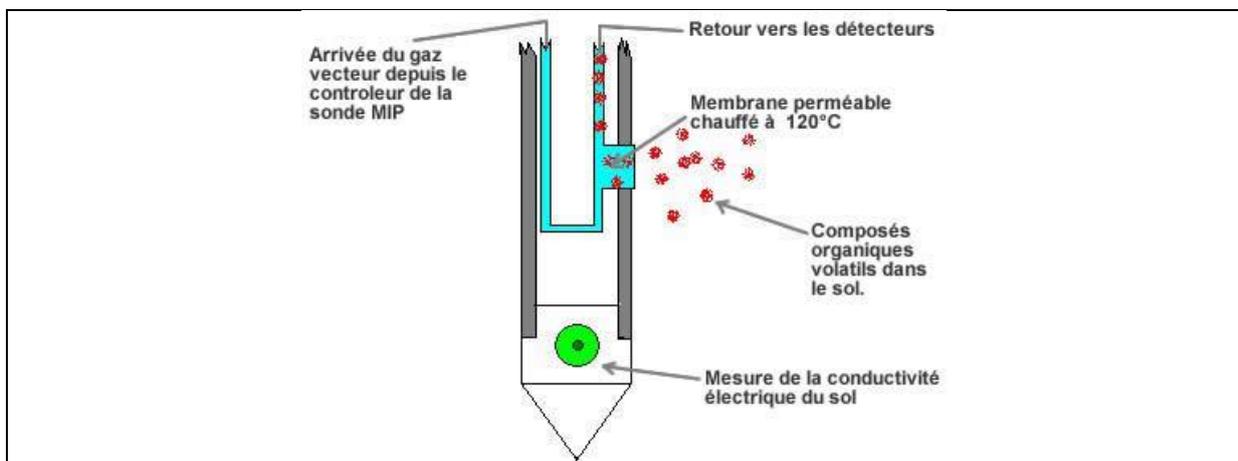


Figure 32 : Cartographie par krigeage des valeurs PID des sols d'une zone d'aménagement concerté (Delcausse & Belbeze, 2003).

4.6.2. Les mesures par sonde MIP

Principe et Appareillage

Le système Membrane Interface Probe (Geoprobe®) est une sonde équipée d'une membrane poreuse enfoncée statiquement dans le sol, puis chauffée à une profondeur voulue (Figure 33). A 120°C, les composés organiques s'évaporent dans le sol et traversent une membrane polymère semi-perméable pour arriver dans une boucle de gaz fermée et inerte qui permet le transport des composés, à travers une série de tubes, jusqu'à un système de détection placé en surface, le chromatographe. Grâce à trois détecteurs (FID, PID, DELCD), ces composés sont immédiatement visualisés sur l'ordinateur en fonction de la profondeur et en parallèle, la conductivité, la température du sol et la vitesse du sondage sont indiquées. La membrane étant imperméable à l'eau, le dispositif peut être utilisé en zone non saturée ou saturée. Le détecteur à ionisation de flamme (FID) permet d'analyser les hydrocarbures aliphatiques, le PID est adapté aux hydrocarbures aromatiques et halogénés tandis que le détecteur à capture d'électrons (DELCD) quantifie les hydrocarbures halogénés.



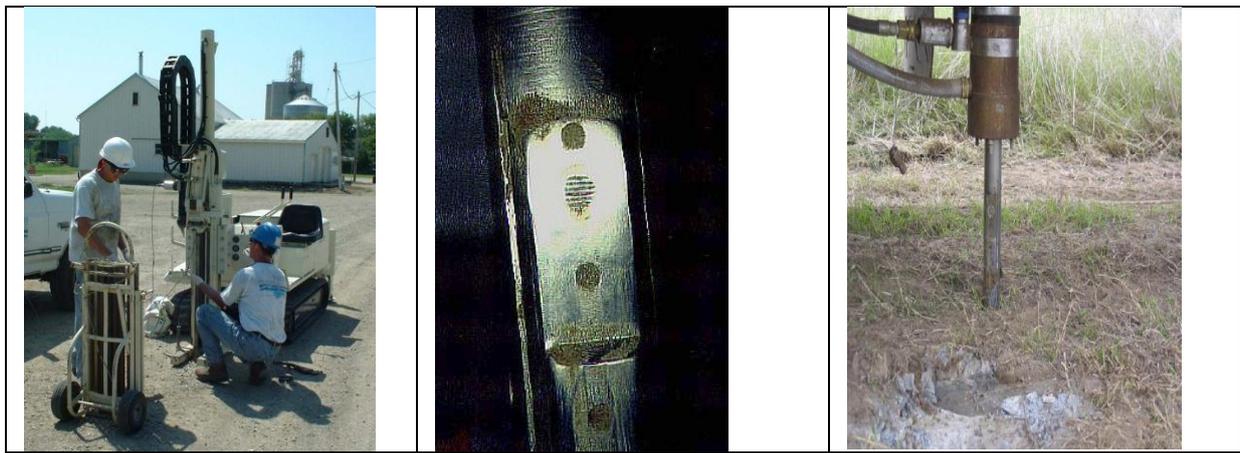


Figure 33 : Schéma de fonctionnement de la sonde MIP et photographies du système de forage Geoprobe, de la sonde MIP et de son insertion.

Les résultats obtenus consistent en des profils verticaux des valeurs mesurées, tel qu'illustré à la Figure 34.

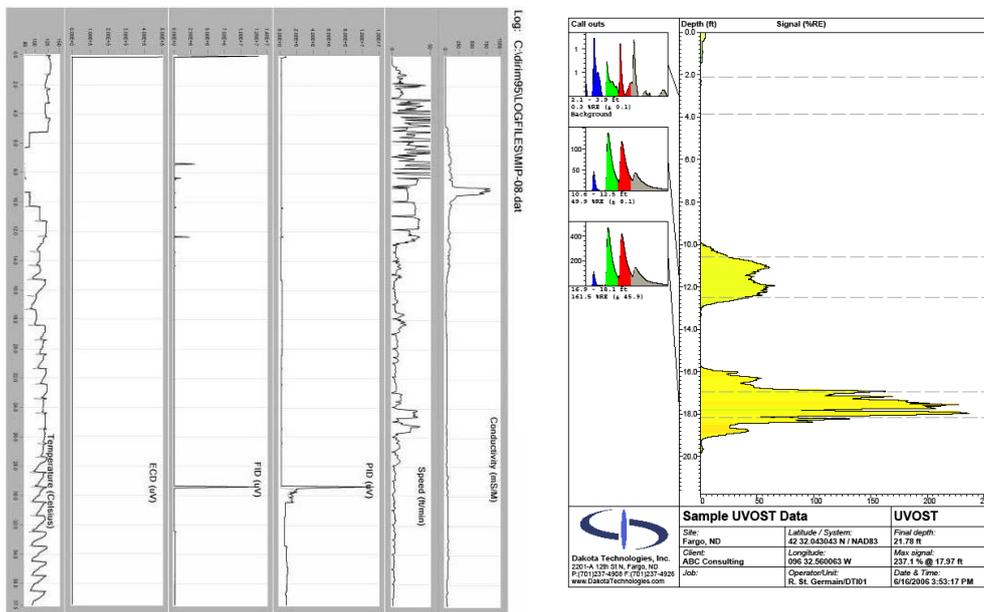


Figure 34 : Exemples de profils verticaux de valeurs mesurées à l'aide d'une sonde MIP.

Exemples d'application de la géostatistique

Une méthode d'interpolation peut ensuite être appliquée pour obtenir une cartographie 2D ou 3D de la variable d'intérêt, comme par exemple sur la Figure 35 qui résulte d'une interpolation déterministe non géostatistique.

L'interpolation doit néanmoins être réalisée avec vigilance, la portée du phénomène pouvant n'être que de quelques mètres dans certains cas. Il importe dès lors de prévoir une densité de forages suffisante et d'évaluer lors de l'étude variographique la continuité spatiale des mesures MIP.

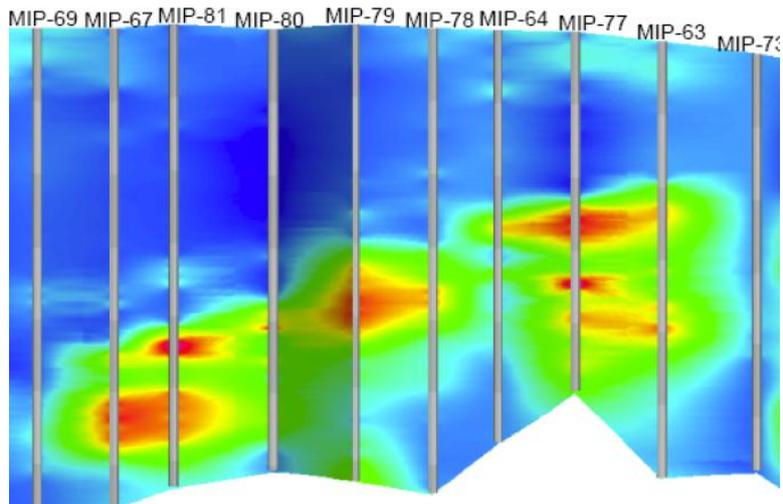


Figure 35 : Exemple de cartographie 2D (section verticale) établie par interpolation de diagraphies MIP ERM (Fiacco, 2009).

4.6.3. Les mesures XRF

Principe et Appareillage

Les spectromètres portables de fluorescence X (XRF) sont des appareils de petite taille permettant d'analyser des éléments métalliques dans du sol (Figure 36). Le dispositif comporte une source de rayons X qui permet de bombarder l'échantillon solide (1). L'énergie transmise (2) peut conduire à l'éjection d'électrons (3), et donc à la création de vides dans les couches électroniques des atomes. Le comblement des vides par des électrons des couches électroniques externes (4) s'accompagne de l'émission de rayons X (fluorescence) dont l'énergie est caractéristique de l'élément et l'intensité est représentative des quantités en jeu.

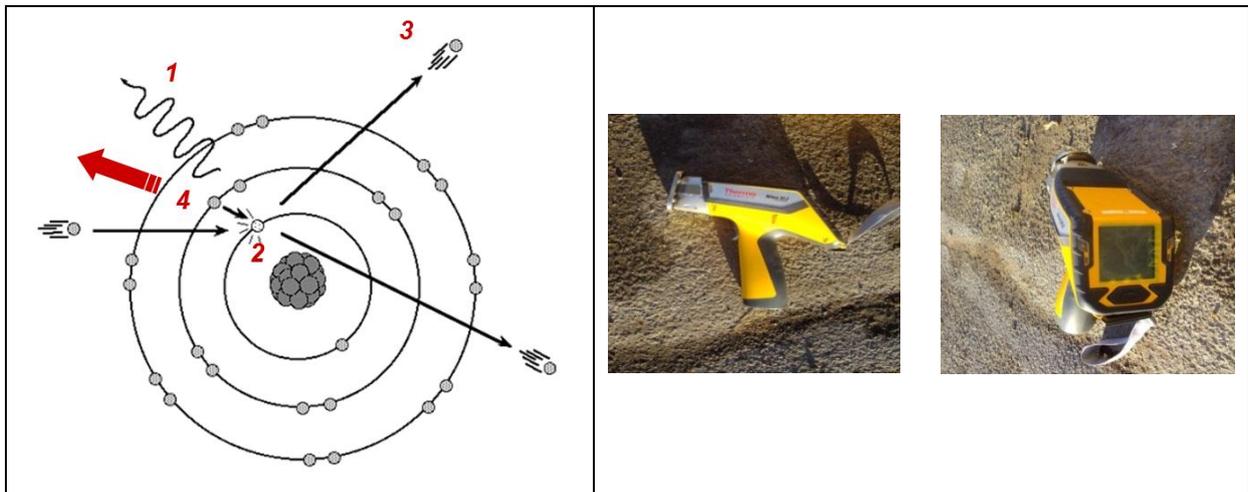


Figure 36 : Principe de la spectrométrie à fluorescence de rayons X et exemples d'appareils XRF portables.

La mesure XRF concerne une petite surface de mesure (5 à 7 cm²) et une faible épaisseur de sol (quelques mm). Elle peut être réalisée in situ, par application de l'appareil à la surface du sol, ou bien après prélèvement puis préparation (homogénéisation, tamisage, séchage) d'un échantillon.

Les résultats fournis par l'appareil peuvent être soumis à un certain nombre d'interférences, tels que l'effet de matrice (physique ou chimique), l'effet de l'humidité, les interférences spectrales, la durée de la mesure ou l'influence du positionnement de l'échantillon face à la fenêtre de lecture.

Des informations plus détaillées sur le dispositif et ses conditions d'utilisation peuvent être trouvées dans le rapport (Laperche & Mossmann, 2004).

Exemples d'application de la géostatistique

Une cartographie des valeurs XRF peut être obtenue directement par simple application d'un krigeage aux données mesurées, tel que présenté à la Figure 37. Il existe néanmoins un écart entre les valeurs mesurées au XRF et celles analysées en laboratoire, qu'il est nécessaire de corriger si les valeurs

XRF doivent être comparées à des valeurs de référence réglementaires. Une autre solution consiste à disposer de doublons (mesures XRF, analyses de laboratoire) sur quelques échantillons, de sorte que les mesures XRF puissent représenter une variable auxiliaire venant enrichir la connaissance de la variable principale formée des analyses de laboratoire. Les techniques de modélisation multivariées décrites au paragraphe 4.3 sont alors applicables. Il est à noter que la précision de la mesure XRF variant avec les éléments, un effet de pépité prononcé peut être observé dans certaines situations. Un exemple de couplage entre analyses en laboratoire et mesures in situ est présenté au paragraphe 6.4, consacré aux dernières innovations scientifiques ayant trait à l'optimisation des stratégies d'échantillonnage.

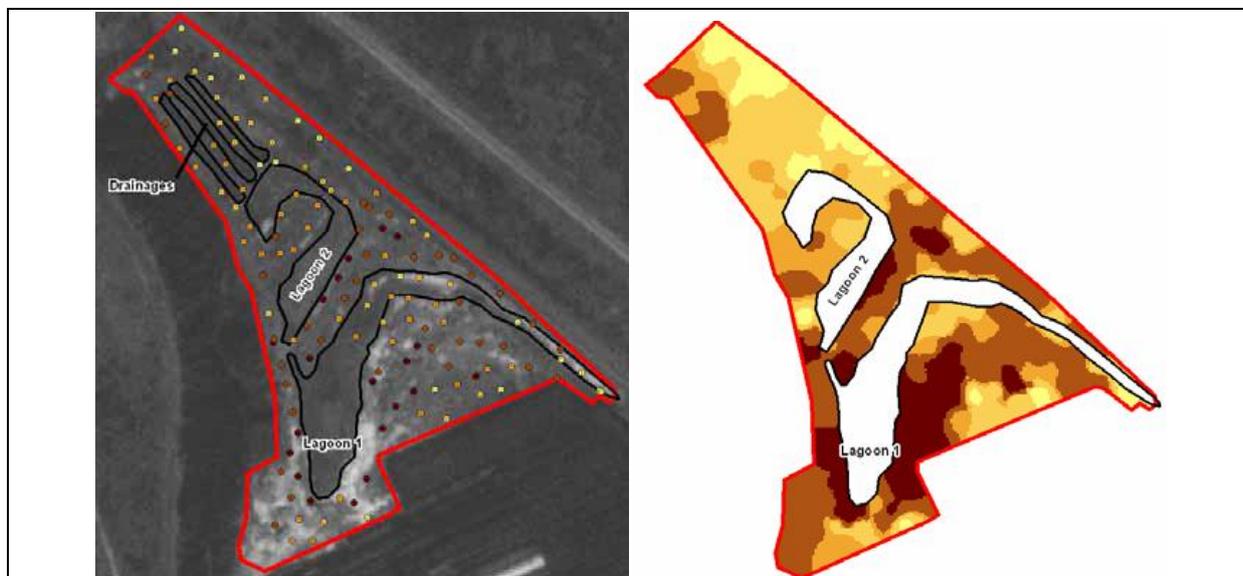


Figure 37 : Exemple de cartographie par krigeage des teneurs en plomb mesurées par XRF (Bing Canar, 2008).

4.6.4. Les mesures de la radioactivité

Principe et Appareillage

Il existe plusieurs types de mesures pour évaluer une contamination radiologique d'un sol ou de structures de génie civil (Desnoyers, 2010). Sans vouloir être exhaustifs, certaines mesures peuvent être réalisées in situ et caractériser les matériaux solides en place, d'autres peuvent être menées au laboratoire sur échantillons.

Trois types de mesure in situ peuvent être réalisés : des mesures de débit de dose, des mesures surfaciques de contamination et des mesures d'activité massique de radionucléides par spectrométrie. Les mesures de débit de dose permettent un comptage global de l'ensemble des rayonnements. Les mesures de surface permettent de mesurer un type de rayonnement et fournit une conversion en activité surfacique. Les mesures par spectrométrie utilisent une sonde plus complexe qui permet d'obtenir une analyse détaillée des radionucléides émetteurs gamma, et des niveaux d'activité massique par radionucléide.

Les investigations sont généralement réalisées en plusieurs phases (IRSN, 2011) où, après une synthèse documentaire, une cartographie de l'activité surfacique est établie à partir des mesures in situ. Des investigations en profondeur sont alors réalisées, avec prise d'échantillons et analyses au laboratoire.

Exemples d'application de la géostatistique

La cartographie surfacique implique l'utilisation de méthodes d'interpolation. Les méthodes géostatistiques sont couramment mises en œuvre à cet effet, telles qu'illustré par les exemples des Figure 38 et Figure 39.

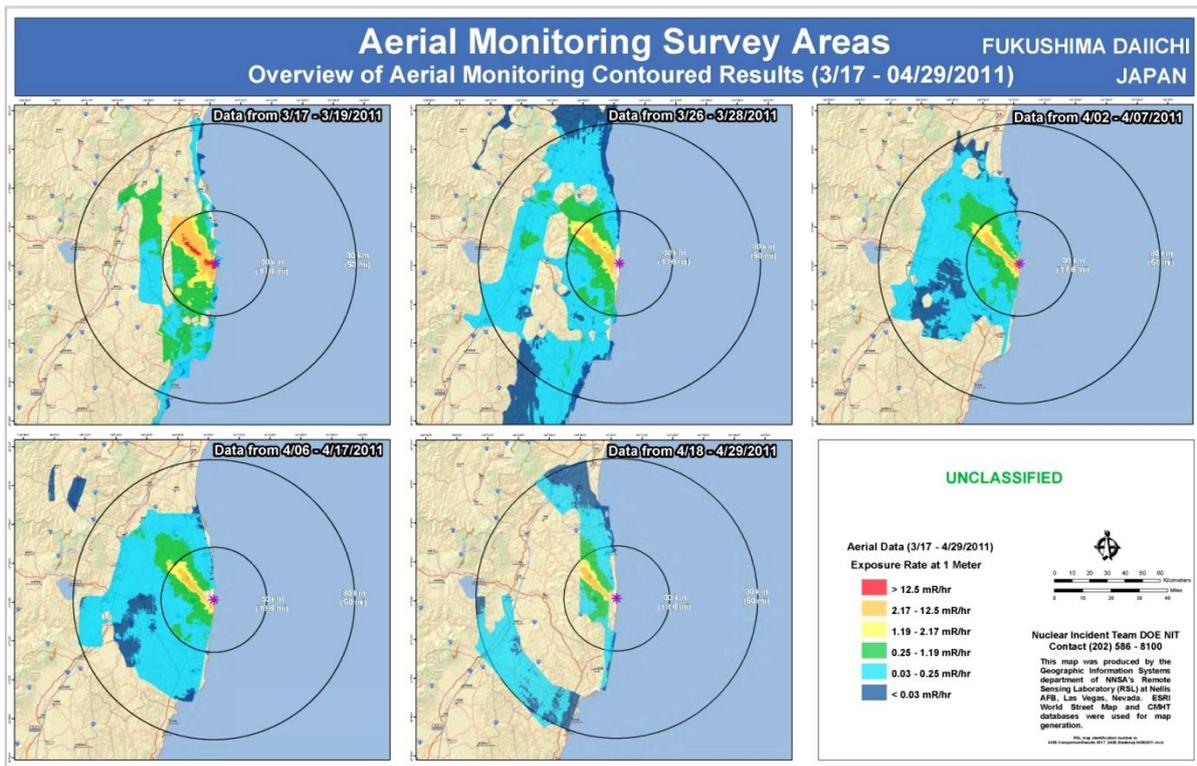


Figure 38 : Exemple de cartographie par krigeage de mesures héliportées sur l'incident nucléaire de Fukuschima - données US DOE (Chambers, 2011).

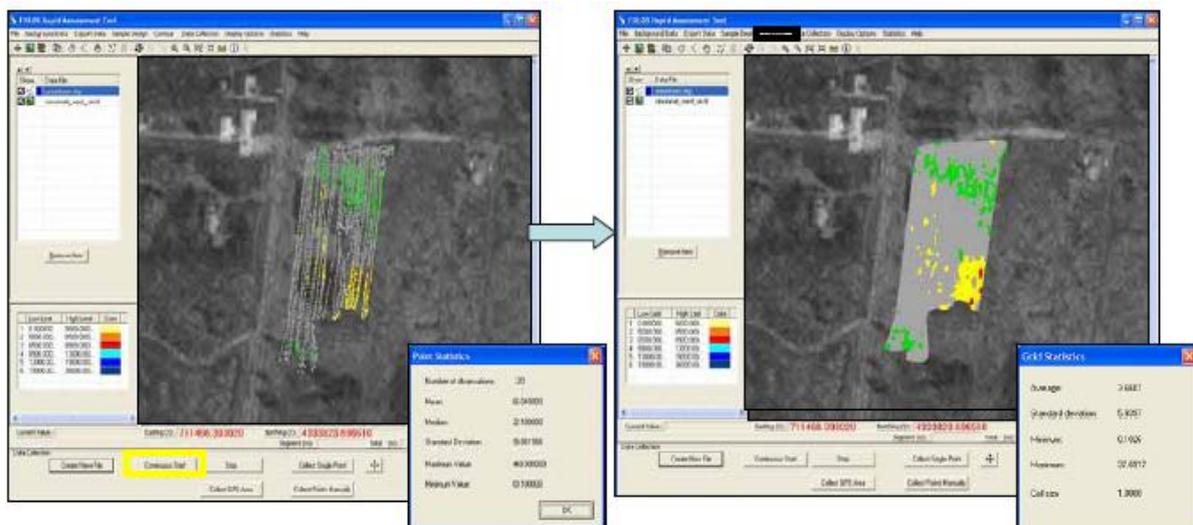


Figure 39 : Exemple de cartographie par krigeage de mesures radioactives sur la décharge IEL, Uniontown, Ohio (NARM, 2008).

Plusieurs centres de recherche ou privés ont par ailleurs développé des dispositifs permettant de cartographier les flux gamma au fur et à mesure de l'acquisition des mesures. Le site de Fontenay-aux-Roses du Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA) a par exemple mis au point un véhicule dédié à la caractérisation des pollutions radiologiques des sols de surface (dispositif VEGAS), embarquant :

- Un système de régulation de la vitesse
- Un système de positionnement par GPS
- Quatre détecteurs (2 DSP, 1 NaI, et 1 GeHP)
- Une plateforme logicielle d'enregistrement et de traitement des données (logiciel KartotraK® Geovariances).



Figure 40 : Le véhicule VEGAS d'acquisition des données surfaciques de radioactivité.

Le logiciel KartotraK permet d'obtenir une cartographie géostatistique des valeurs surfaciques au fur et à mesure de l'acquisition des données, et d'optimiser ainsi le positionnement des nouveaux points de mesure en fonction de la précision de la cartographie obtenue (Geovariances, 2011).

4.7. En résumé

Dans le domaine des sites et sols pollués, les données géophysiques ou de terrain sont souvent utilisées pour désigner des zones propices aux sondages ou à l'implantation de piézomètres. Comme cela a été présenté aux paragraphes précédents, la géostatistique peut être appliquée à certaines méthodes afin de les **valoriser** et ce avec de très bons résultats. Divers systèmes automatiques ont même été créés pour collecter les données en temps réel, réaliser des traitements géostatistiques et afficher sur site les résultats (Kartotrak de Geovariances, FAST de USEPA région 5).

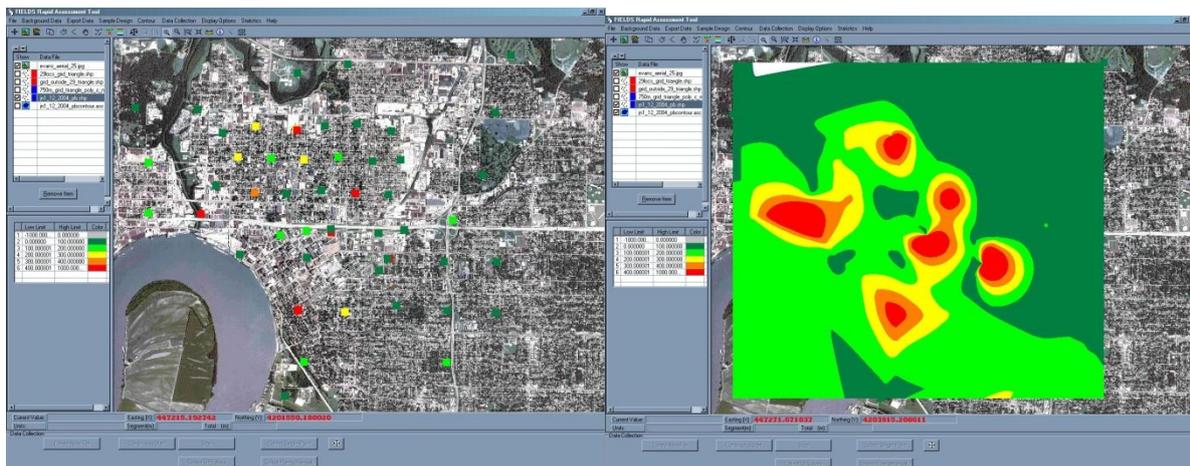


Figure 41 : Jacobsville Neighborhood XRF Phase 1 Collection (Sleboda Braun, 2005).

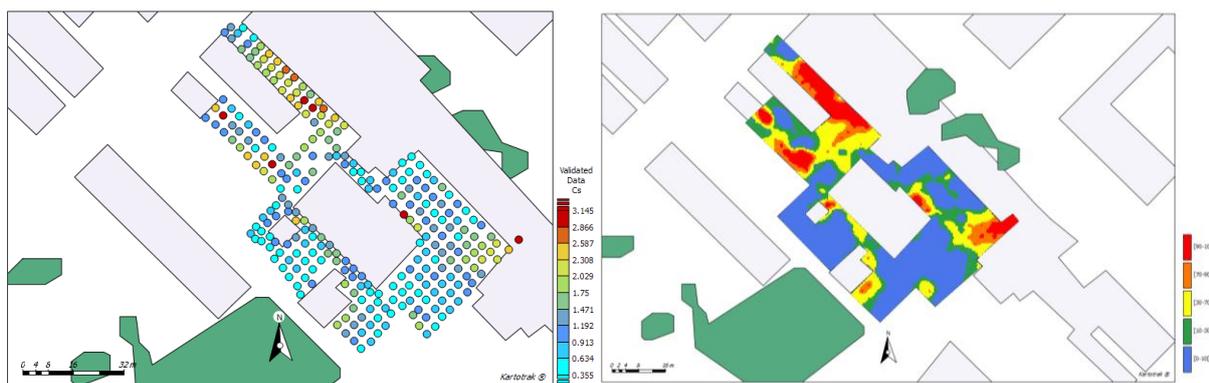


Figure 42 : Plan d'échantillonnage et cartographie de la probabilité de dépassement d'un seuil de contamination (Geovariances, 2011).

Le Tableau 2 présente le résumé de l'appréciation des possibilités de valorisation géostatistique des mesures géophysiques et de terrain d'Antea Group décrites dans ce chapitre. De manière plus générale, les commentaires formulés par le bureau Antea Group sur la base de retours d'expérience dans le domaine sont les suivants.

L'emploi combiné de mesures sur site ou géophysiques et de la géostatistique apparaît comme permettant :

- de caractériser plus précisément un site,
- de prendre de bonnes décisions,
- de mieux connaître les risques et au final,
- de réaliser de meilleures dépollutions.

Il peut par conséquent sembler étonnant que ces techniques restent si peu utilisées, que ce soit en France ou aux Etats Unis (Nagourney, 2008). Plusieurs barrières à la diffusion de ces techniques peuvent être avancées :

- Institutionnelles
 - La politique nationale des sols pollués ne prend pas en compte les concepts d'incertitude, support de mesure et autre concepts géostatistiques pertinents,
 - L'aspect juridique des décisions prime sur le succès ou les aspects techniques des dépollutions,
 - Les perspectives de changement sont en général faibles.
- Techniques
 - en cas de référé, les données de terrain, la géophysique etc. ne sont pas suffisamment robustes,
 - Les certifications ne s'appliquent pas encore à la mesure ou aux études géostatistiques,
 - Les budgets d'étude des sites pollués sont insuffisants pour produire suffisamment de données pour la géostatistique,
 - La complexité des corrélations entre grandeur géophysique et polluants ne simplifie pas l'intégration explicite de ces données indirectes dans l'estimation des teneurs en polluants.
- Individuelles
 - Peur de ne pas respecter le budget d'étude alloué,
 - Que faire si les résultats ne sont pas aussi précis que se l'imaginait le client,
 - Les ingénieurs ont rarement été formés à ces techniques et de ce fait ne les proposent pas,
 - Les décisionnels ne sont pas sachant des possibilités techniques offertes.

Finalement, il apparaît que la géostatistique permet fréquemment de valoriser des mesures géophysiques ou de terrain, au travers d'interpolations notamment. En revanche, **ces mesures indirectes sont rarement intégrées explicitement dans le modèle géostatistique sous forme de variables auxiliaires.**

Tableau 2 : Valorisation géostatistique actuelle de diverses mesures géophysiques ou de terrain.

Méthode	Valorisation géostatistique actuelle	Remarques
Electrique	Oui , cartographies 2D, 3D sur les données d'inversion	A interpréter avec prudence. Permet une meilleure visualisation de la complexité des phénomènes de pollution.
Magnétique	Non , bien que possible	Nouvelles techniques géostatistiques locales pourraient améliorer les traitements actuels
Electromagnétique	Oui , cartographies 2D, 3D	Excellents résultats. Il existe des traitements géostatistiques spécifiques.
Radar	Non , bien que possible	Traitement géostatistique dédié à l'archéologie
Micro gravimétrie	Oui , excellents résultats en cartographies 2D, 3D	Pas utilisée en sites et sols pollués.
Sismique	Oui , excellents résultats en cartographies 2D, 3D, modèles de vitesse et géologie 3D	Pas utilisée en sites et sols pollués.
Thermographie IR	Oui , cartographies 2D, 3D	Peu utilisée en sites et sols pollués du fait de son coût
Imagerie hyperspectrale	Non	Peu utilisée en sites et sols pollués du fait de son coût
Radioactivité	Oui , excellents résultats en cartographies 2D, 3D	
Mesure des gaz du sol	Oui avec précautions pour cartographies 2D, 3D	L'incertitude de mesure doit être prise en compte
Diagraphies MIP	Oui , cartographies 2D, 3D	Attention aux incertitudes de mesures et à la portée du phénomène
XRF	Oui , cartographies 2D	Incertaines élevées pour certains métaux

5. Le contexte de mise en œuvre actuel

Ce chapitre dresse un tableau du contexte dans lequel la géostatistique des sites pollués est actuellement utilisée, en précisant les logiciels à disposition, les offres de formation, la position des autorités vis-à-vis de cet outil et l'état de la recherche dans ce domaine.

5.1. Les outils (logiciels)

Les logiciels qui peuvent être utilisés pour réaliser une étude géostatistique peuvent être classés en cinq grandes catégories :

1. Logiciels dédiés à la géostatistique : certains sont généraux (1.a) et peuvent de ce fait être utilisés dans des domaines très variés (ex. pétrole, mine, santé, air, eau,...), d'autres sont développés pour un domaine d'application spécifique (1.b), dont les sites contaminés.
2. Systèmes d'information géographique (SIG, 2D) intégrant des outils géostatistiques.
3. Logiciels de visualisation 3D du milieu souterrain (géotechnique, mine, environnement) intégrant des outils géostatistiques.
4. Logiciels de modélisation 3D de réservoirs souterrains (pétrole, mine) intégrant des outils géostatistiques.
5. Langages de programmation et environnements de développement permettant de développer les outils de calcul nécessaires à une modélisation géostatistique. Certains auteurs, souvent des universitaires, mettent à disposition du public des codes de calcul géostatistique qu'ils ont développés pour leurs besoins propres.

Une liste, non exhaustive, de ces différents types de logiciels est fournie au Tableau 3. D'autres informations peuvent être trouvées sur le site <http://www.ai-geostats.org/> et dans les articles (Goovaerts, 2010) et (Hengl, 2007).

Indépendamment des caractéristiques techniques (système d'exploitation, modélisation 2D ou 3D, compatibilité avec d'autres logiciels, etc.) et financières, quelques critères sont à considérer dans le choix d'un logiciel :

1. **Complexité de l'étude et de ses objectifs.** L'utilisation d'un module de géostatistique intégré à un SIG (2.) ou un logiciel de visualisation 3D (3.) peut suffire lorsqu'il s'agit d'établir une cartographie simple d'un paramètre donné par krigeage pour obtenir un premier aperçu de la répartition d'un polluant. Des outils plus sophistiqués, disponibles dans les logiciels dédiés, sont en revanche requis lorsqu'il s'agit d'étudier une pollution complexe (multi-polluants, supports variés, etc.) et que des estimations servant de base à des prises de décision doivent être produites (ex. estimations de volumes et tonnages en appui à la définition d'un projet de réhabilitation). Une appréciation qualitative des logiciels pour répondre à la complexité des études et objectifs est suggérée dans le Tableau 3 (échelle de + à +++).
2. **Niveau de connaissance des méthodes géostatistiques et des méthodes de programmation de l'utilisateur, temps à disposition.** Une personne sachant programmer et maîtrisant les concepts de la géostatistique peut développer ses propres outils, les adapter au problème posé, ou bien encore utiliser des boîtes à outils mises à disposition par des développeurs (5.). Les logiciels généralistes dédiés à la géostatistique (1.a) permettent d'éviter cette phase de développement, mais requièrent une bonne connaissance des méthodes géostatistiques pour être capable de les appliquer à bon escient. Depuis quelques années, les développeurs de logiciels proposent des *workflows* par lesquels les utilisateurs sont guidés dans la suite de fonctions à mettre en œuvre pour atteindre un objectif donné (ex. cartographie de la probabilité de dépassement d'un seuil, estimation de volume et incertitude). Les utilisateurs perdent en liberté, mais peuvent utiliser néanmoins les méthodes géostatistique avec une moindre connaissance théorique et plus de rapidité. Les avantages et inconvénients des *workflows* se retrouvent dans les logiciels de géostatistique dédiés à un domaine d'utilisation précis (1.b). Le niveau de connaissance requis pour utiliser les logiciels est apprécié sur une échelle de + à +++ dans le Tableau 3.
3. **Appui dans l'utilisation du logiciel et mises à jour.** L'utilisation adéquate d'un logiciel nécessite souvent une formation et un appui utilisateur. Il est important également que le logiciel soit mis à jour régulièrement pour rester compatible avec l'évolution des systèmes d'exploitation et autres logiciels, et pour bénéficier des dernières avancées technologiques. Ces services ne sont pas toujours fournis, il est donc important de bien se renseigner avant de choisir un outil. Quelques informations ont été fournies à ce sujet dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Logiciels de modélisation géostatistique (liste non exhaustive).

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.html Livre : analysis and modeling of spatial environmental data, M.Kanevski & M.Maignan, EPFL press	CH	2D	Analyse statistique exploratoire, analyse variographique, krigage, 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 »										
Kartotrak	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 <i>workflow</i> dans GOCAD	commercial	Kidova www.kidova.com	F	3D	Analyse statistique exploratoire, analyse variographique, cokrigeage, cosimulations,...	++	+	(1)	(1)
2. Outils géostatistiques intégrés dans un SIG										
ArcGIS Geostatistical analyst	extension proposée dans ArcGIS, <i>workflow</i>	commercial	ESRI http://www.esri.com/software/arcgis/extensions/geostatistical	USA	2D	Analyse statistique exploratoire, analyse variographique, cokrigeage, 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, krigeage Visualisation 3D de surface	+	+	support par tél ou email, formation par vidéos, forum utilisateurs,	2012
EVS		commercial	C Tech http://www.ctech.com/	USA	3D	Variographie, krigeage Visualisation 3D de surface	+	+	support par email, formations traditionnelles, forum utilisateurs	2012
4. Outils géostatistiques intégrés dans un logiciel de modélisation 3D										
3D Geomodeller	extension (plug-in) Isatis	commercial	BRGM, Intrepid geophysics http://www.geomodeller.com/	F, A	3D	Analyse statistique exploratoire, analyse variographique, cokrigeage, 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, cokrigeage, 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.	+++	+++	support par tél ou email, formations traditionnelles ou en ligne, forum	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
						De nombreux auteurs mettent de plus à disposition des « boîtes à outils géostatistiques » Matlab : mGstat, Matlab kriging toolbox, etc.			utilisateurs	
R	outils développés et vérifiés par la communauté de statisticiens avant mise en ligne	gratuit	statisticiens du monde entier http://www.r-project.org/	Nlle 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.

5.2. Les formations

Les offres de cours en géostatistique destinés aux professionnels sont de deux types :

1. Formations destinées à prendre en main un logiciel de géostatistique ou à développer ses propres outils,
2. Formations destinées à enseigner les concepts de la géostatistique et les conditions d'application à un domaine.

Les organismes commercialisant ou utilisant un logiciel de géostatistique exclusif proposent le plus souvent les deux types de formation, ou des formations conjuguant à la fois des aspects théoriques et pratiques d'introduction au logiciel. D'autres organismes ne sont pas attachés à un logiciel, et proposent de ce fait des formations où différents outils peuvent être mis en œuvre en fonction des besoins des études. D'autres encore initient également à la programmation en vue de développer ses propres outils de traitement géostatistique des données.

Des formations attachées à des logiciels ont déjà été mentionnées dans le Tableau 3 du paragraphe 5.1 précédent. Sans chercher à être exhaustifs, sur la base de notre connaissance du domaine, nous avons également dressé une liste d'organismes proposant régulièrement en France et dans d'autres pays des formations appliquées aux données environnementales, et plus spécifiquement aux données de sites et sols pollués (Tableau 4) sans attachement à un logiciel.

A cette offre régulière, s'ajoutent des cours-blocs organisés de manière occasionnelle par des centres de compétence universitaires. Ces centres, recensés au § 5.4.3 de la page 64, sont à contacter spécifiquement pour connaître leur offre annuelle de formations courtes ouvertes aux professionnels. Enfin, il est à noter qu'un certain nombre de cours sont annoncés sur le site de l'association promouvant l'application de la géostatistique à l'environnement geoENVia (<http://geoenvia.org/>).

Tableau 4 : Formations en géostatistique appliquée à l'environnement (liste non exhaustive).

Organisme	Enseignement	Formules	Durée	Langues	Pour plus de renseignements
Ar2tech	- concepts de la géostatistique - géostatistique appliquée à différents domaines, dont les données environnementales	- à la demande - local adapté au cas par cas ou en interne à l'entreprise formée	- 1 semaine - un à qqs jours	- français - anglais	http://ar2tech.com/training
Centre de géosciences CG Mines Paris Tech 35 rue Saint Honoré F-77305 Fontainebleau	- concepts de la géostatistique - géostatistique appliquée à l'environnement	- régulières ou à la demande - au CG ou en interne à l'entreprise formée	- 3 semaines - 1 semaine - un à qqs jours	- français - anglais	http://www.geosciences.mines-paristech.fr/web/fr/equipes/geostatistique/les-formationen-dispensees/formation-continue-en-geostatistique
eOde 7 chemin de Mont-Riant CH-2000 Neuchâtel	- introduction à la géostatistique - géostatistique appliquée aux sites et sols pollués	- régulières ou à la demande - local adapté au cas par cas ou en interne à l'entreprise formée	- 1 semaine - un à qqs jours	- français - anglais	http://www.eode.ch/
Ephesia Consult 9 rue Boissonnas CH-1227 Genève + bureaux en France et Belgique	- introduction à la géostatistique - analyse géostatistique de données environnementales - géostatistique appliquée aux sites et sols pollués	- régulières ou à la demande - local adapté au cas par cas ou en interne à l'entreprise formée	- 1 semaine - un à qqs jours	- français - anglais	http://www.ephesia-consult.com/
Geovariances 49bis avenue Franklin	- introduction à la	- régulières ou à la demande	- 1 semaine - un à qqs	- français - anglais	http://www.geovariances.com/en/training-in-geostatistics-for-

Roosevelt F-77215 Avon Cedex	géostatistique - géostatistique appliquée à différents domaines, dont les sites et sols pollués	- dans les locaux de Geovariances ou en interne à l'entreprise formée	jours		the-environment-sessions-de-formation-en-francais-ar800
Kidova 155 avenue Roger Salengro F-92370 Chaville	- concepts de la géostatistique - géostatistique appliquée à différents domaines, dont les sites et sols pollués	- à la demande - dans les locaux de Kidova, un local adapté au cas par cas ou en interne à l'entreprise formée	- 1 semaine - un à qqs jours	- français - anglais	http://www.kidova.com/
PGeostat LLC 710 Ridgemont Lane Ann Arbor, MI 48103, USA	- concepts de la géostatistique - géostatistique appliquée aux données environnementales et de santé	- à la demande - local adapté au cas par cas ou en interne à l'entreprise formée	- 1 semaine - un à qqs jours	- français - anglais	https://sites.google.com/site/goovaertspierre/

5.3. La position des autorités

Les méthodes et outils adaptés à la caractérisation et la réhabilitation des sites et sols pollués ne sont pas mentionnés dans le cadre légal des différents pays, mais dans les guides méthodologiques, directives et aides à l'exécution destinés aux professionnels. La recherche des recommandations sur l'emploi de la géostatistique dans les différents guides officiels de quelques pays européens et nord-américains sur les sites et sols pollués (Tableau 5) met en évidence les positions suivantes :

- **Depuis 1989, l'agence de protection de l'environnement des Etats-Unis (US EPA)** recommande l'utilisation de la géostatistique et présente la technique du krigeage de bloc comme solution de cartographie des pollutions de sites contaminés, dans deux guides, l'un destiné à l'assurance qualité de l'échantillonnage des sols (référence n°1 du Tableau 5) et l'autre présentant des méthodes pour évaluer l'atteinte des objectifs de dépollution sur les sols (référence n°2). Par la suite, l'US EPA a évalué et supporté financièrement différents logiciels de géostatistique développés spécifiquement pour les besoins des sites et sols pollués (cas du logiciel SADA, références n°4 et 6). Depuis une dizaine d'années, l'US EPA promeut la « **triad approach** » (références n°7 et 8), démarche itérative de caractérisation des sites pollués faisant appel à des techniques de mesures rapides sur site pour adapter « en temps réel » les campagnes d'échantillonnage : les méthodes géostatistiques sont conseillées dans ce cadre, puisqu'elles permettent de valoriser les nombreuses données mesurées sur le terrain et d'optimiser les campagne d'investigation en identifiant les zones de plus grande incertitude.
- **Depuis 2008, le centre d'expertise en analyse environnementale du Québec** (dépendant du ministère en charge de l'environnement) mentionne la géostatistique comme un outil permettant d'optimiser le schéma d'échantillonnage des sites pollués qui présentent un nombre significatif d'échantillons (méthode jugée non adaptée aux cas mineurs), dans son guide d'échantillonnage des sols (référence n°9). De plus, la **directive de 2012 sur la réalisation des évaluations des risques toxicologiques** éditée par l'institut national de la santé publique (référence n°10) recommande l'application de la géostatistique aux données d'échantillonnage en appui à l'évaluation des risques associés aux projets de réhabilitation des sites contaminés.
- **Depuis 2003 en Suisse**, la géostatistique est mentionnée comme outil d'interprétation possible des données dans le **manuel de prélèvement du sol** (référence n°11) édité par l'**office fédéral de l'environnement**, destiné aux pollutions diffuses affectant le sol pédologique. Aucun guide n'existe en revanche sur les techniques d'interpolation applicables aux sites pollués (pollutions limitées d'origine industrielle pouvant affecter le sol pédologique, mais aussi les terrains sous-jacents et les eaux souterraines).
- **Depuis 2007 en France**, le **guide méthodologique sur les diagnostics de sites** (référence n°12) du ministère en charge de l'environnement mentionne la géostatistique comme outil possible d'interprétation des données, et considère la géostatistique, comme la statistique,

comme des méthodes d'optimisation de la maille d'un schéma d'échantillonnage systématique des sols. L'application de ces méthodes aux sites contaminés est jugée fournir des « résultats mitigés et peu satisfaisants du fait de l'hétérogénéité des sols...et de la forte variabilité spatiale des teneurs à petite distance ».

- **Dans l'état de Baden-Württemberg en Allemagne**, la géostatistique apparaît simplement mentionnée dans des rapports d'étude ou de recherche de sites particuliers réalisées durant les années 1990' et 2000' (références n°13 et 14).
- **En Wallonie, le guide final de référence pour l'étude de caractérisation (GREC) des sols** est paru le 30 septembre 2012. Il constitue une des éléments du **code wallon des bonnes pratiques** pour mettre en œuvre le Décret sol du 5 décembre 2008. La géostatistique fait l'objet de deux paragraphes du guide. Elle y est décrite comme une méthode adaptée à la caractérisation de remblais ou la caractérisation et la délimitation de taches de pollution pour des sites complexes, lorsque les données sont suffisantes (référence n°15).

Tableau 5 : Directives et guides évoquant la position des autorités vis-à-vis de la géostatistique (liste non exhaustive)

N°	Pays	Document	Extraits /Description
1	USA	"soil sampling quality assurance user's guide", 2d edition, march 1989, United States Environmental Protection Agency, EPA/600/8-69/046	p.116 "In general, a suitable soil sample from a number of possible sampling designs may be selected on the basis of random, stratified random, judgmental, or systematic sampling. The authors recommend the use of geostatistical techniques as the most appropriate methods of handling spatial data. The tools of geostatistics are easier to apply and the utilization of resources is better if one of the systematic designs is used." Chapter 10 Geostatistics, p.149 – 154 : présentation de la technique du krigeage de bloc.
2	USA	«methods for evaluating the attainment of clean-up standards. Volume 1: soil and solid media", February 1989, United States Environmental Protection Agency, EPA 230/02-89-042	Chapter 10 The use of geostatistics for evaluating the attainment of clean-up standards.
3	USA	« a rationale for the assessment of errors in the sampling of soil", May 1990, United States Environmental Protection Agency, EPA 600/4-90-013	Mention de la géostatistique pour estimer la variabilité d'un contaminant dans le sol.
4	USA	« GEO-EAS 1.2.1, geostatistical environmental assessment software, user's guide », april 1991, United States Environmental Protection Agency, EPA 600/8-91/008	Guide d'utilisation d'un logiciel de géostatistique pour les sites et sols pollués (2D, krigeage).
5	USA	« an X Ray fluorescence survey of lead contaminated residential soils in Leadville, Colorado: a case study », march 1993, United States Environmental Protection Agency, EPA/600/R-93/073	Cas d'étude impliquant une étude géostatistique des données pour optimiser l'espacement d'un échantillonnage complémentaire et délimiter les zones contaminées.
6	USA	« environmental decision support software Decision FX, sampling FX. Environmental technical verification report », 2000, United States Environmental Protection Agency, EPA/600/R-00/038	Analyse critique par l'US EPA d'un logiciel permettant de visualiser, d'optimiser l'échantillonnage et de réaliser une analyse coût-bénéfice de sols et eaux souterraines contaminées (2D, sur base de GSLIB)
7	USA	http://www.triadcentral.org/	La mise en œuvre de la triad approach implique l'adaptation en temps réel des programmes d'échantillonnage en utilisant des appareils de mesure de terrain à réponse quasi-immédiate. La valorisation des données passe par des outils de gestion et de visualisation incluant des méthodes géostatistiques : FIELDS et SADA, développés avec le support de l'US EPA : http://www.triadcentral.org/tech/dsp_sub.cfm?id=25
8	USA	"guidance for monitoring at hazardous waste sites : framework for monitoring plan	Guide méthodologique sur la surveillance des sites pollués faisant référence à la triad approach.

N°	Pays	Document	Extraits /Description
		<p>development and implementation”, januar 2004, United States Environmental Protection Agency, OSWER directive n° 9355.4-28</p> <p>http://www.epa.gov/superfund/policy/guidance.htm</p>	
9	Québec	<p>« Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales. Cahier 5 : échantillonnage des sols », août 2008, révisé le 5 février 2010, centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (ministère en charge de l'environnement)</p> <p>http://www.mddep.gouv.qc.ca/sol/terrains/</p>	<p>p. 14 Paragraphe 3. Campagne d'échantillonnage, 3.2 patron d'échantillonnage, cas d'un échantillonnage aléatoire systématique : « dans certains cas, un outil comme le géostatistique peut permettre le calcul de la dimension optimale des mailles. La géostatistique est définie comme étant une méthode statistique pour l'analyse de données linéaires, corrélées dans l'espace. Pour permettre de calculer la dimension des mailles, cette méthode exige qu'elle soit incorporée au début d'un projet de caractérisation et qu'un nombre important d'analyses préliminaires soient effectuées pour vérifier la variabilité des échantillons. Elle est donc peu applicable lors de caractérisation de cas mineurs ayant un nombre restreint d'échantillons. »</p>
10	Québec	<p>« Lignes directrices pour la réalisation des évaluations du risque toxicologique d'origine environnementale au Québec », février 2012, institut national de la santé public</p> <p>http://www.mddep.gouv.qc.ca/sol/terrains/</p>	<p>p. 84 et 85 Annexe 1 : procédures particulières pour les évaluations du risque toxicologique réalisées dans le cadre de projets de la réhabilitation de terrains contaminés</p> <p>« Caractérisation environnementale : lors de la réalisation d'une évaluation du risque toxicologique dans le contexte de projets de réhabilitation de terrains contaminés, ...</p> <p>Pour ce qui est de la caractérisation, une attention particulière devrait être portée à deux points particuliers, soit la profondeur qui doit être prise en considération pour l'évaluation du risque et la distribution géostatistique des résultats sur un site donné... »</p> <p>« Distribution géostatistique des échantillons : la caractérisation environnementale revêt une grande importance lors d'une évaluation du risque toxicologique. Comme on connaît rarement l'ensemble des concentrations de polluants dans l'espace, l'analyste doit s'assurer, avant de procéder à l'évaluation du risque, qu'il a une bonne connaissance du terrain à l'étude. Pour ce faire, il peut utiliser l'historique du terrain pour tenter de définir des zones de contamination distinctes. L'analyste peut également avoir recours à une analyse spatiale ou géostatistique des données d'échantillonnage. Un certain nombre de méthodes d'interpolation ou d'extrapolation spatiale peuvent être employées pour déterminer les patrons spatiaux d'un site spécifique. Ainsi, un secteur dont la contamination est nettement supérieure en termes de concentration ou nettement différente en termes de nature doit être considéré séparément. Lorsque l'analyse permet d'identifier des patrons ou des zones de contamination différents sur un même site à l'étude, il est nécessaire de procéder à une évaluation du risque pour chacune de ces zones. Les concentrations présentes dans les sols d'un secteur contaminé (par exemple au-delà des critères C) ne doivent pas être traitées avec les données d'un autre secteur non contaminé (par exemple sous la limite de quantification) par ces substances, à moins que l'analyse spatiale ou géostatistique ne montre qu'il s'agit d'une même population de données. »</p>
11	Suisse	<p>“Manuel de prélèvement sol (OSol) : prélèvement et préparation d'échantillons de sol pour l'analyse de substances polluantes », 2003, Office Fédéral de l'Environnement, VU-4814-F</p> <p>Manuel relatif aux sols pédologiques uniquement</p>	<p>p.20 paragraphe 3.3 Programme d'étude, tableau 3 : la géostatistique est mentionnée comme méthode d'interprétation des résultats d'échantillonnage des sols et de délimitation de la zone d'étude.</p> <p>p.22, paragraphe 3.4 Plan d'échantillonnage « Ce dispositif (...d'échantillonnage systématique renforcé...) se prête bien à l'interpolation de grandeurs mesurées au moyen de méthodes géostatistiques ».</p>

N°	Pays	Document	Extraits /Description
12	France	Guide méthodologique « diagnostics du site », version 0, 8 février 2007, Ministère en charge de l'environnement	p.45 « type d'interprétation des données (d'investigation) : cartographie, statistique, géostatistique » p.192, optimisation de l'échantillonnage : « dans le cadre d'une stratégie d'échantillonnage systématique, pour estimer de manière la plus précise le nombre minimum d'échantillons nécessaires, l'emploi de méthodes statistiques ou géostatistiques offre la possibilité d'optimisation de la maille de la grille, en fonction de la taille minimale des auréoles de concentration (points chauds) à détecter et l'intervalle de confiance souhaité. Dans la pratique, l'application de ces méthodes sur les lieux contaminés donne des résultats mitigés et peu satisfaisants du fait de l'hétérogénéité du sol (souvent constitué de terrains remaniés ; de remblais, matériaux de démolition, terres, migration des polluants dans les milieux...), de la forte variabilité spatiale des teneurs à petite distance due l'hétérogénéité de distribution des polluants dans un sol, des spécificités de chaque site, des contraintes financières ou de délais. »
13	D Baden-Württemberg	« Die Erkundung der Stoffgefährlichkeit ehemaliger Hausmülldeponien », 1993, service de l'environnement de Baden-Württemberg Investigation de substances dangereuses d'anciennes décharges" http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/1208/	p.20, paragraphe 3.3.1.6 Dépendance spatiale de la contamination : mention d'une analyse géostatistique des données permettant d'étudier leurs corrélations spatiales à plus ou moins grande distance.
14	D Baden-Württemberg	« Optimierung von Erkundungsstrategie und Qualitätssicherung beim Einsatz von Feldanalytik in der Altlastenbearbeitung », février 2000, rapport de recherche FZKA-BWPLUS, Ertel-Schutz Optimisation des stratégies d'investigation et assurance-qualité en cas d'utilisation de mesures de terrain dans le traitement des sites contaminés http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/1208/	p.6 mention de l'utilisation du programme Surfer, version 6.04 Golden software, pour évaluer la distribution spatiale de la pollution (krigeage).
15	B - Wallonie	Code des bonnes pratiques en région Wallonne http://dps.environnement.wallonie.be/pages/FR/GeSol.CWBP.htm	p.51 à 54, paragraphe 2.2.2.B.4 description de la géostatistique comme un outil de caractérisation possible des remblais pollués. Des informations sont fournies sur l'analyse exploratoire, l'intégration de données de plusieurs études, la synthèse statistique des informations, la nécessité de dégroupement des données, l'effet de support et les concentrations en polluants représentatives. p.77, paragraphe 2.2.2.C.5 description de la géostatistique comme un outil de caractérisation des taches de pollution dans des sites complexes (3D, multi-polluants), renseignés par un nombre suffisant de données.

5.4. La recherche dans le domaine

L'état actuel des connaissances a été établi à partir d'une synthèse bibliographique des articles publiés dans le domaine. Les sources de documentation utilisées sont la base de données universitaire isi web of science, les actes des conférences geoENV (geostatistics for environmental applications, conférence européenne bisannuelle organisée par l'association geoENVia⁴) et du congrès international de géostatistique GEOSTATS, ainsi que quelques documents scientifiques et techniques en possession des auteurs (ex. manuel méthodologique de l'association GeoSiPol⁵ (Chiles et al., 2005)).

⁴ <http://geoenvia.org>

⁵ <http://geosipol.org>

5.4.1. Nombre de publications et évolution dans le temps

L'évolution de l'importance du thème de la géostatistique appliquée aux sites pollués au cours du temps a été étudiée en comparant le nombre d'articles publiés sur le thème par période.

Sur la totalité de la période de recensement des publications scientifiques dans la base de données isi web of science, de 1899 à 2011⁶, **215** articles ont été dénombrés sur le thème. Mais, alors qu'aucun document n'est recensé entre 1899 et 1989, leur nombre passe de **58 sur la période 1990-2000** à **157 sur la période 2001-2011** (Tableau 6).

Cette augmentation du nombre d'articles sur le sujet doit être considérée avec précaution car on assiste depuis plusieurs années à une augmentation du nombre de publications scientifiques dans tous les domaines. Le nombre de publications sur le thème de la géostatistique appliquée aux sites pollués a donc été rapporté au nombre de publications sur le thème général des sites contaminés produites sur les mêmes périodes. Ces valeurs relatives viennent confirmer la **tendance à l'augmentation** du nombre d'articles sur le thème (Tableau 6 et Figure 43).

Le nombre d'articles dédiés à la géostatistique reste néanmoins modeste : il représente **moins de 1%** de toute la littérature sur le domaine des sites contaminés, mais il est à noter que ce domaine est particulièrement foisonnant et diversifié car il concerne des disciplines universitaires très variées (toxicologie, chimie, hydrogéologie,) et constitue un thème d'actualité pour toutes les sociétés ayant un passé industriel important.

Tableau 6 : Nombre d'articles scientifiques sur le thème de la géostatistique appliquée aux sites pollués recensés dans la base de données isi web of science.

Période	Durée	Nombre d'articles « géostatistique et sites pollués »	Nombre d'articles « sites pollués »	Nombre d'articles « géostatistique et sites pollués » rapporté au nombre d'articles « sites pollués »
1899-1989	91 ans	0	137	0.00%
1990-2000	11 ans	58	8691	0.67%
2001-2011	11 ans	157	18936	0.83%

(a)

(b)

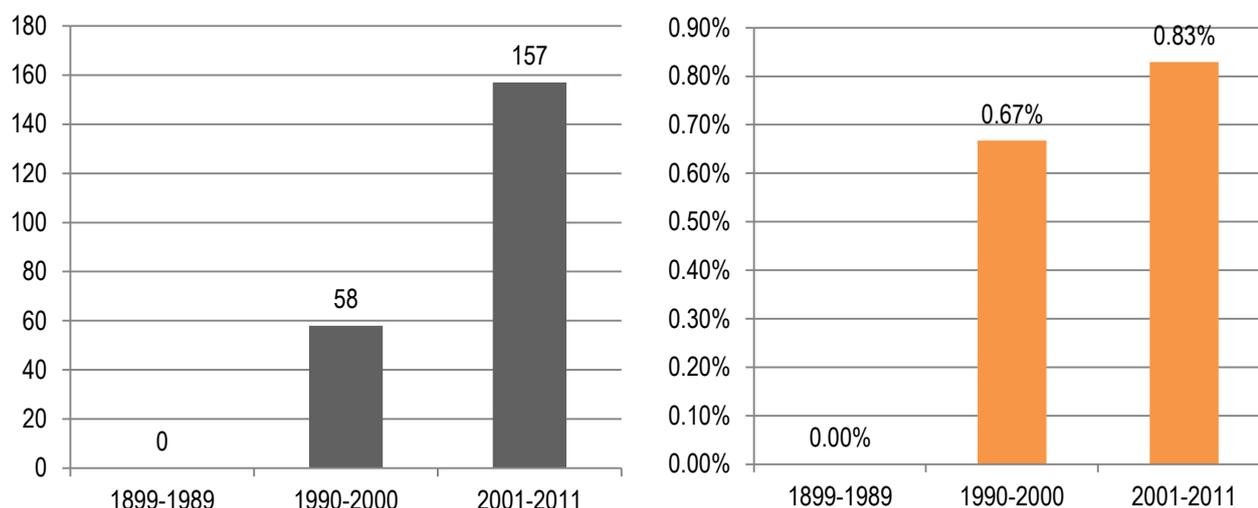


Figure 43 : Nombres d'articles « géostatistique et sites pollués » par périodes : valeurs absolues (a) et valeurs relatives rapportées au nombre d'articles « sites pollués » publiés sur les mêmes périodes.

⁶ L'année 2012 en cours n'a pas été prise en compte dans le calcul des statistiques sur le nombre d'articles par périodes (année non complète). Les 4 publications recensées sur les 4 premiers mois de cette année ont néanmoins été intégrées dans la synthèse bibliographique.

5.4.2. Sujets traités

Les tendances suivantes sont observées sur l'ensemble des publications :

- De nombreux articles (45) présentent des cas d'étude mettant en œuvre des techniques classiques de la géostatistique (krigeage simple ou ordinaire, krigeage d'indicateur) dans des systèmes d'information géographique (SIG) ou autres logiciels disposant d'un module géostatistique. Ces publications ne manifestent pas d'avancées technologiques majeures, mais sont néanmoins intéressantes car elles mettent en valeur une utilisation plus large de la géostatistique dans la pratique, comme outil de cartographie, grâce à la multiplication des logiciels dédiés ou des modules de géostatistique attachés à des logiciels de visualisation et traitement des données (cf. § 5.1, p.53).
- Les cas traités sont majoritairement des cas de pollution aux métaux lourds (63, y compris les articles avec développements méthodologiques illustrés sur un cas d'étude), le plomb étant le plus largement étudié. On trouve également des pollutions organiques aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP, 9 articles), aux hydrocarbures halogénés plus denses que l'eau (DNAPL, 8 articles), aux radionucléides (3 articles), aux composés plus légers que l'eau (LNAPL, 2 articles), aux hydrocarbures aliphatiques (2 articles), aux composés organiques persistants (POP, 1 article), ainsi que des pollutions complexes organiques et inorganiques (Tableau 7).

Tableau 7 : Nombre d'articles «géostatistique et sites pollués » par type de polluants.

Métaux	HAP	DNAPL	radionucléides	HC	LNAPL	POP
63	9	8	7	3	2	1

- La géostatistique est appliquée à des échelles très variées : pays entier, région, secteur industriel (brownfield), site industriel ou portion de site. La surface modélisée peut donc aller de plusieurs centaines de milliers de kilomètres carrés à quelques centimètres carrés.
- Les activités industrielles à l'origine des contaminations et les types de polluants modélisés sont également très diversifiés, comme le montre la liste (non exhaustive) ci-dessous.
 - Fonderies au zinc et au plomb
 - Traitement de rails en bois au créosote (HAP)
 - Usines à gaz (HAP)
 - Cokeries (HAP)
 - Raffineries de pétrole (HC, métaux)
 - Nettoyages à sec (DNAPL)
 - Fuite de réservoir enterré (DNAPL)
 - Accident de Tchernobyl (radionucléides)
 - Sites miniers de charbon et métaux (HAP, métaux)
 - Dépôt de vieilles voitures (PCB, hydrocarbures aliphatiques, métaux)
 - Stockage de déchets issus du traitement du charbon
 - Usine de production de céramique (métaux, dont plomb)
 - Industrie métallurgique (métaux)
 - Tannerie
 - Usines de traitement de surface (DNAPL, métaux)
 - Aciéries (métaux)
 - Décharges industrielles (BTEX, HAP, métaux, cyanures, hydrocarbures aliphatiques)
 - Sites militaires (explosifs renfermant du trinitrotoluène et du dinitrotoluène, DNAPL)
 - Production de fer (métaux)
 - Industries chimiques (métaux, dont chrome, ou multi-pollution)

- Incinérateur (dioxine)

En dehors de la présentation de cas d'étude, les articles abordent des points méthodologiques qui peuvent être regroupés dans les catégories suivantes :

- Développements méthodologiques spécifiques (45 articles)
- Intégration d'informations auxiliaires (18)
- Combinaison de la géostatistique à d'autres modèles (11)
- Comparaison de la géostatistique à d'autres méthodes de modélisation (3)
- Application pratique de la géostatistique (2)
- Stratégies d'échantillonnage et optimisation (22)
- Présentation de nouveaux logiciels (4)

5.4.3. Les centres de compétence

Il n'existe pas de centre spécialisé uniquement sur le thème de la géostatistique des sites et sols pollués, mais plutôt des travaux de recherche réalisés sur le thème dans plusieurs centres de compétence en géostatistique.

Les centres de recherche en géostatistique se sont généralement constitués pour répondre au besoin en modélisation spatiale ou spatio-temporelle d'un domaine particulier, que ce soit les géosciences (mines, pétrole, gaz, puis déchets et sites contaminés), la pédologie et l'agronomie, les eaux souterraines ou bien la santé. On les retrouve de ce fait attachés à leur département d'origine.

Certains sont réputés pour leurs capacités d'innovation en concepts et méthodes géostatistiques. D'autres se sont davantage spécialisés dans le traitement de cas pratiques, que ce soit sur un large spectre de sujets ou bien sur un domaine d'application particulier.

La taille des groupes de recherche est variable : ils peuvent être constitués d'un très petit nombre de géostatisticiens (un professeur et son équipe) ou bien atteindre une vingtaine de personnes. Les plus grands groupes ont les moyens de faire progresser en parallèle les aspects théoriques et pratiques de la géostatistique.

Une liste non exhaustive de centres de compétences en géostatistique de l'environnement a été rassemblée au Tableau 8 sur la base de notre connaissance du domaine, en mentionnant leur taille et leurs axes principaux de recherche, ainsi que ceux ayant déjà étudié l'application de la géostatistique aux sites et sols pollués.

Tableau 8 : Centres de compétences en géostatistique de l'environnement (liste non exhaustive).

Nom	Axes de recherche	Nombre de géostatisticiens (phD, post-docs, maîtres-assistants, professeurs)	Publications « géostatistique et sites et sols pollués » ?	Plus d'informations / Responsable de groupe
Concepts novateurs en géostatistique				
Centre de géosciences CG Mines Paris Tech 35 rue Saint Honoré F-77305 Fontainebleau	- Centre fondateur de la géostatistique - Développements théoriques de méthodes géostatistiques - Application de la géostatistique à de très nombreux domaines	~ 15	oui	http://www.geosciences.mines-paristech.fr/fr/equipes/geostatistique Jacques Rivoirard jacques.rivoirard@mines-paristech.fr
School of earth science Energy resources engineering Stanford University 367 Panama Street Green Earth Sciences 065 USA-Stanford, CA 94305-4007	- Développements théoriques de méthodes géostatistiques - Application de la géostatistique au domaine pétrolier et gazier essentiellement (abrite le Stanford Center for Reservoir Forecasting)	~ 20	non	http://scr.f.stanford.edu/ Jef Caers jcaers@stanford.edu
Groupe hydrogéologie stochastique Centre de géothermie et d'hydrogéologie (CHYN) Université de Neuchâtel Rue Emile Argand CH-2000 Neuchâtel	- Développements théoriques de méthodes géostatistiques - Application de la géostatistique au domaine de l'eau essentiellement et du pétrole	~ 10	non	http://www2.unine.ch/cms/lang/fr/pid/18829 Philippe Renard jcaers@stanford.edu
Unité de biostatistique et processus spatiaux INRA PACA Domaine Saint-Paul Site Agroparc F-84914 Avignon	- Développements théoriques de méthodes géostatistiques - Application de la géostatistique à l'écologie, l'épidémiologie et la biologie des populations	~ 15	non	http://www.paca.inra.fr/les_recherches/pole_production_horticole_integree_phi_1/bio_statistique_et_processus_spatiaux_biosp Denis Allard allard@avignon.inra.fr
Institute for Geoinformatics University of Münster Weseler Straße 253 D-48151 Münster	- Développements théoriques de méthodes géostatistiques - Application de la géostatistique à divers domaines de l'environnement (air, radioactivité)	~ 15	oui	https://ifgi.uni-muenster.de/ Edzer Pebesma edzer.pebesma@uni-muenster.de
Spatial statistics and environmental statistics Dept of statistics	- Développements théoriques de méthodes de statistiques spatiales - Application à divers domaines de	~ 10	oui	http://www.stat.osu.edu/~sses/ Noël Cressie

Nom	Axes de recherche	Nombre de géostatisticiens (phD, post-docs, maîtres-assistants, professeurs)	Publications « géostatistique et sites et sols pollués » ?	Plus d'informations / Responsable de groupe
The Ohio state university 408 Cockins Hall USA-Columbus OH 43210-1247	l'environnement			ncressie@stat.osu.edu
Institut de géomatique et d'analyse du risque (IGAR) Faculté des géosciences et de l'environnement Université de Lausanne Amphipôle CH-1015 Lausanne	- Développements théoriques de méthodes géostatistiques - Application de la géostatistique à divers domaines de l'environnement (forêt, air, sol, radioactivité, radon,...)	~ 5	oui	http://www.unil.ch/igar Mikhaël Kanevski Mikhail.Kanevski@unil.ch
Centre for geographical health research School of Geography University of Southampton Highfield UK-Southampton SO17 1BJ	- Développements théoriques de méthodes de statistiques et géostatistiques - Application à divers domaines de l'environnement et de la santé	~ 15	non	http://www.cghr.soton.ac.uk/ Peter Atkinson pma@soton.ac.uk
Application de la géostatistique à l'environnement				
Center for modelling petroleum reservoir (CMRP) Instituto Superior Técnico de Lisboa Av. Rovisco Pais P-1049-001 Lisbon	- Application de la géostatistique au domaine de l'environnement et du pétrole	~ 10	oui	http://cmrp.ist.utl.pt/ Amilcar Soares asoares@ist.utl.pt
Group Soil spatial inventory techniques (ORBit) Department of Soil Management University of Gent Coupure links 653 B-9000 Gent	- Application de la géostatistique à divers domaines de l'environnement (sites et sols pollués, mesures sur site et non intrusives, optimisation de l'échantillonnage)	< 10	oui	http://www.ugent.be/bw/soilmanagement/en/research/ResearchGroupSoilSpatialInventoryTechniques Marc Van Meirvenne Marc.VanMeirvenne@UGent.be
Department of Earth Observation Science Faculty of geo-information science and earth observation University of Twente PO Box 217 NL-7500 AE Enschede	- Application de la géostatistique à divers domaines de l'environnement	?	oui	http://www.itc.nl/EOS Alfred Stein stein@itc.nl

Nom	Axes de recherche	Nombre de géostatisticiens (phD, post-docs, maîtres-assistants, professeurs)	Publications « géostatistique et sites et sols pollués » ?	Plus d'informations / Responsable de groupe
Unité Infosol INRA Orléans 2163 Avenue de la pomme de pin CS 40001 Ardon F-45075 Orléans Cedex 2	- Application de la géostatistique aux sols pédologiques	< 5	oui	http://www.orleans.inra.fr/les_unites/us_infosol Dominique Arrouays arrouays@orleans.inra.fr
Soil Protection group Institute of Terrestrial Ecosystems ETH Zurich Universitätstrasse 16 8092 Zurich Switzerland	- Application de la géostatistique aux sols pédologiques	< 5	oui	http://www.soilprot.ethz.ch/about/ Rainer Schülin rainer.schulin@env.ethz.ch

6. Les dernières innovations scientifiques

Ce chapitre rentre dans le détail des dernières innovations scientifiques ayant trait à l'utilisation de la géostatistique dans les étapes de caractérisation des sites et sols pollués, en s'appuyant sur les articles recensés sur les douze dernières années (2000-2012) (cf. synthèse bibliographique décrite au paragraphe 5.4). Y sont présentés les derniers développements méthodologiques destinés spécifiquement aux sites et sols pollués, les essais de combinaison de la géostatistique à d'autres modèles utiles à l'évaluation des sites (évaluation des risques sanitaires, modélisation des écoulements et transport de polluants, analyse multicritère pour choisir un procédé de dépollution), la comparaison de la géostatistique à d'autres méthodes d'estimations spatio-temporelles, les solutions d'optimisation des stratégies d'échantillonnage et les tests d'applicabilité de la géostatistique à ces situations concrètes. L'état des connaissances actuelles sur l'intégration d'informations auxiliaires a en revanche été intégré au chapitre 2.

6.1. Développements méthodologiques

La démarche géostatistique à suivre pour contrôler la qualité des données d'entrée, réaliser une analyse exploratoire des données par des outils statistiques simples, estimer la répartition spatiale d'une variable (cartographie), analyser le risque de dépasser une valeur de référence (cartographie des probabilités de dépassement de seuils) et en déduire les quantités (volumes, tonnages) de matériaux contaminés est désormais bien établie. Elle a été présentée en détail en France dans le manuel de l'association GeoSiPol (Chiles et al., 2005). Mais certains problèmes méthodologiques subsistent, comme évoqué dans (D'Or, Demougeot-Renard, & Garcia, 2008, 2009) :

- Les histogrammes des indicateurs de pollution présentent souvent un grand nombre de valeurs inférieures à la limite de détection et un petit nombre de valeurs très élevées (distributions dissymétriques et « censored data ») ;
- La taille des échantillons collectés au stade investigation est très petite par rapport à celle des blocs excavés en cours de dépollution (changement de support) ;
- Les estimations géostatistiques fournies aux donneurs d'ordre sont assorties d'une estimation de l'incertitude qui n'est généralement pas intégrée au processus décisionnel.

Certains auteurs discutent et proposent des solutions à ces problèmes (§ 6.1.1 à 6.1.3), tandis que d'autres présentent des méthodes spécifiques s'adaptant à des situations particulières de pollution (§ 6.1.4).

6.1.1. Distributions dissymétriques

Les données de pollution constituent généralement des populations très dissymétriques, présentant un petit nombre de valeurs très élevées (Figure 44). Ces distributions posent des problèmes de modélisation car la plupart des méthodes géostatistiques ont été développées dans un cadre multigaussien.

La solution classique consiste à 1) transformer les données en distributions gaussiennes (normales) à l'aide de fonctions, 2) modéliser la variable transformée puis 3) appliquer une transformation inverse pour obtenir un modèle de la variable brute.

Mais les résultats peuvent être sensiblement différents selon la fonction de transformation choisie.

Comme alternative aux transformations classiques par logarithme, anamorphose ou scores normaux (NST), (Juang, Lee, & Ellsworth, 2001) testent une **transformation de rang** sur des données de pollution aux métaux lourds pour effectuer une estimation par krigeage. Néanmoins, (Wu et al., 2006) constatent peu de différences entre les résultats obtenus par les fonctions logarithmiques, NST et de transformation de rang (rank order transformation) sur un cas de contamination du sol au zinc (Nord Dakota, USA). Les auteurs (Marchant, Saby, Jolivet, Arrouays, & Lark, 2011) proposent quant à eux d'utiliser une fonction multivariable plus générale basée sur des **copules**⁷, qu'ils testent pour cartographier les concentrations en Cd sur l'ensemble du territoire français.

⁷ Type de fonction de distribution utilisée pour décrire la dépendance entre variables aléatoires.

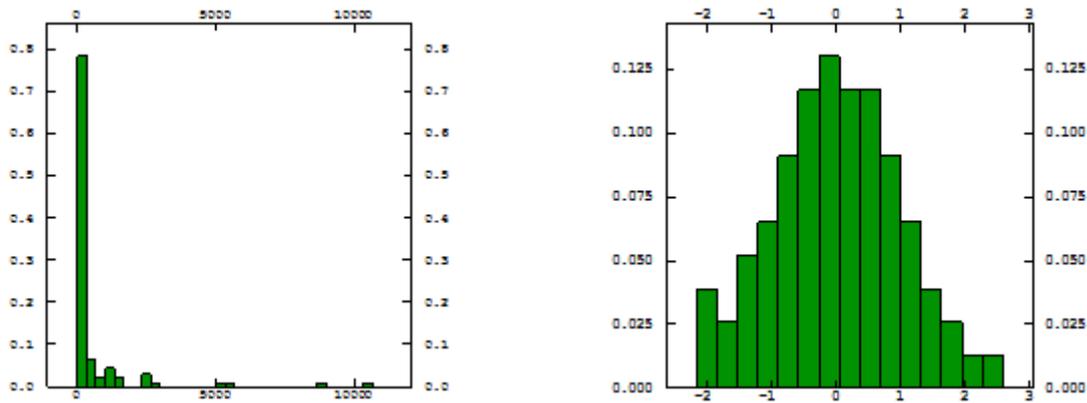


Figure 44 : Exemple de distribution dissymétrique observée sur des données de pollution de sol industriel (gauche) et distribution obtenue après transformation (droite).

La technique du krigeage lognormal peut également être utilisée en cas de population très dissymétrique, mais un certain nombre de problèmes pratiques se posent là encore (Roth, 1998), notamment lors de la transformation inverse (back-transformation). Ce résultat est confirmé par (Singh & Ananda, 2002), qui ont constaté que certaines valeurs obtenues par krigeage lognormal après transformation étaient de plusieurs ordres de grandeur plus élevées que les valeurs mesurées (application sur un site contaminé du Tennessee, site Superfund, USA, multi-pollution). Les auteurs proposent alors une technique alternative, où le krigeage est appliqué à la variable formée du rang de chacune des concentrations en polluant dans la distribution (krigeage de rang), avant transformation inverse. La transformation inverse contraint ainsi les valeurs estimées à rester dans la gamme des valeurs mesurées (Figure 45 (Singh & Ananda, 2002)).

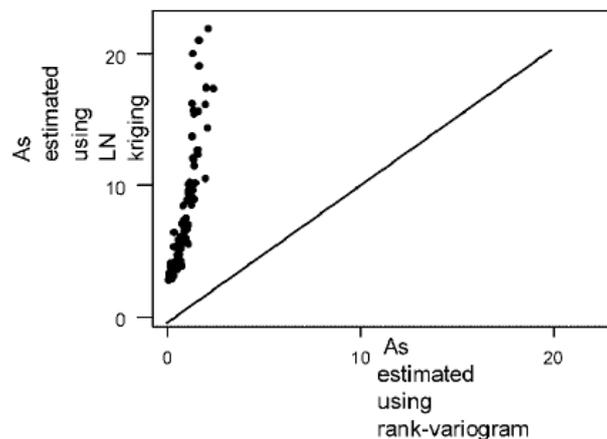


Figure 45 : Nuage de corrélation entre les concentrations en arsenic estimées par krigeage de rang (abscisse) et krigeage lognormal (ordonnée) (Singh & Ananda, 2002).

Une autre approche est proposée par (Yamamoto, 2007) pour effectuer la transformation inverse. Testée sur un cas synthétique, elle paraît réduire les biais observés habituellement avec un krigeage lognormal.

Les performances du krigeage lognormal en présence de distributions dissymétriques restent cependant controversées. Ainsi la comparaison par validation croisée des résultats du krigeage ordinaire et du krigeage lognormal de concentrations en cadmium d'un sol forestier suédois par (Kishne, Bringmark, Bringmark, & Alriksson, 2003) montrerait que les valeurs les plus élevées de la distribution sont estimées avec plus de justesse par le krigeage ordinaire. Les auteurs (Saito & Goovaerts, 2000) mettent en revanche en évidence de meilleures capacités de prévision du krigeage lognormal par rapport au krigeage ordinaire, au krigeage multi-gaussien⁸ et au krigeage d'indicatrice (illustration sur un site Superfund contaminé à la dioxine, Piazza road, Missouri, USA). Ces résultats semblent dépendre des caractéristiques du jeu de données initial, mais également des critères de comparaison adoptés.

⁸ krigeage de la variable transformée par NST, puis transformation inverse.

La dissymétrie des distributions affecte également les résultats d'estimation de la classification de sols par rapport à des seuils (estimations non linéaires). La fonction de transformation d'anamorphose appliquée aux données brutes pour obtenir une distribution gaussienne (donc se ramener dans le cadre théorique du modèle multigaussien) (Desnoyers, Chiles, Dubot, Jeanne, & Idasiak, 2011) peut avoir un effet destructurant sur les valeurs extrêmes. En alternative au modèle multigaussien, les auteurs proposent d'utiliser des modèles (isofactoriels Hermiteens) plus généraux dont l'effet destructurant des valeurs extrêmes est moindre. La Figure 46 met en valeur les différences entre les résultats du krigeage disjonctif dans les deux types de modèles sur des mesures de radioactivité du béton d'anciennes installations nucléaires.

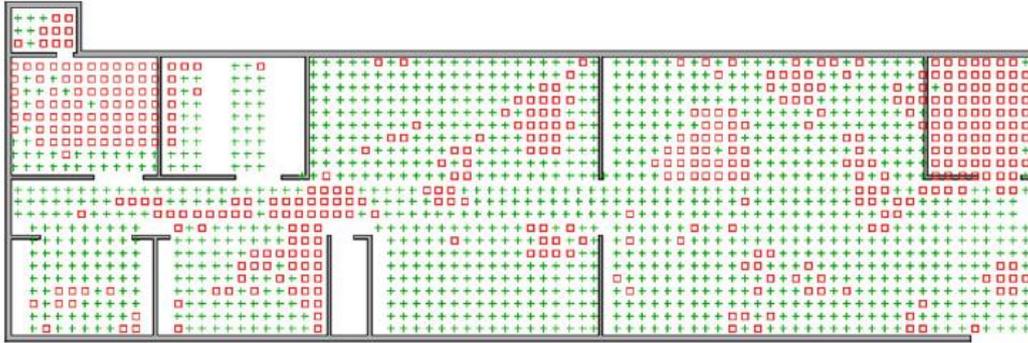


Figure 46 : Krigeage disjonctif de mesures de radiations nucléaires avec transformation préalable des données. Croix vertes : valeurs plus faibles dans le modèle multigaussien. Carrés rouges : valeurs plus élevées (Desnoyers et al., 2011).

6.1.2. Données inférieures au seuil de détection (« censored data »)

La difficulté de transformer des données en une distribution gaussienne est accrue par la présence d'un pic de valeurs inférieures ou égales à une limite de détection (LD) (Figure 44). Plusieurs pistes sont envisageables pour contourner ce problème, qui reste souvent ignoré en pratique. Ainsi, (D'Or et al., 2009) proposent de modéliser la variable d'intérêt par une combinaison de deux variables indépendantes : une variable indicatrice de la présence/absence de polluants et une variable continue décrivant les variations de concentrations en polluants (supérieures à LD) là où les polluants sont présents. Cette technique, couramment utilisée dans d'autres domaines, a été testée par les auteurs sur le site belge de Chimeuse (11.5 ha, multipollution).

Dans la réalité, les valeurs inférieures à une limite de détection sont probablement spatialement corrélées même si la technique analytique ne permet pas de le mettre en évidence. (Rathbun, 2006) propose une démarche permettant d'intégrer cette corrélation.

6.1.3. Changement de support

Le support des données disponibles est souvent très varié, constituant ainsi des populations statistiquement hétérogènes (Figure 47).

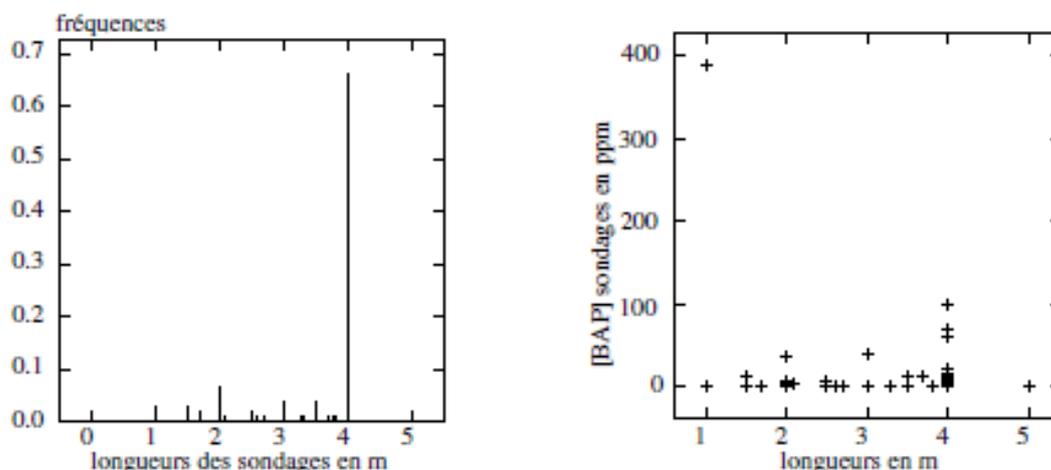


Figure 47 : Illustration de la variabilité des supports des données de site pollué : échantillons représentatifs de hauteurs allant de 1 à 5 m (gauche), sans corrélation visible avec les concentrations mesurées en benzo(a)pyrène (droite) (H. Demougeot-Renard, 2002).

Les données ne peuvent dans ce cas pas être mélangées : des sous-populations homogènes de même support doivent être recherchées pour être estimées séparément ou bien de manière conjointe si des corrélations peuvent être mises en évidence (cokrigage, co-simulations).

Un autre problème tient à la différence de support entre les données d'investigation, utilisées pour construire un modèle prédictif, et celles utilisées pour réaliser le tri des sols au stade dépollution : un changement de support doit être opéré sur les données d'investigation (volume d'échantillon de l'ordre du cm^3) pour que le modèle prédictif se rapproche des volumes qui seront réellement dépollués sous forme de blocs (volume d'un bloc de plusieurs m^3).

Le changement de support est pris en compte classiquement en générant des simulations de la variable d'intérêt sur un petit support (assimilable à un « point »), cohérent avec celui des données d'investigation, puis en en déduisant des simulations de bloc par le calcul de la moyenne des valeurs simulées de point dans chacun des blocs (H. Demougeot-Renard & De Fouquet, 2004).

La moyenne des valeurs ponctuelles peut cependant s'avérer inappropriée sur des sites pollués présentant une grande variabilité à l'échelle même du bloc : une unique valeur ponctuelle dépassant le seuil de référence peut induire un dépassement du seuil pour la valeur moyenne de bloc et déclencher sa dépollution, alors que le reste des valeurs ponctuelles sont bien en dessous du seuil. Pour contourner cet inconvénient, (D'Or et al., 2009) proposent d'ajouter un critère supplémentaire de sélection des blocs à dépolluer : la proportion de valeurs ponctuelles au sein d'un bloc dépassant le seuil de référence. L'intégration de ce critère dans le calcul des probabilités de dépassement de seuil aboutit à des valeurs de probabilité plus contrastées, facilitant la délimitation de secteurs « sains » et « contaminés » (les blocs de probabilités intermédiaires de dépassement de seuil, proches de 50%, dont moins nombreux, en ce sens l'incertitude sur la classification des blocs de l'ensemble du domaine d'étude est réduite).

En alternative aux simulations, d'autres auteurs recommandent et testent l'utilisation du **krigeage disjonctif** (Desnoyers et al., 2011; Emery, 2006, 2007) pour calculer les probabilités de dépassement de seuil, car cette technique permet de modéliser le changement de support dans des modèles gaussiens discrets ou gamma.

Les auteurs (Paul & Cressie, 2011) développent quant à eux les équations du **krigeage lognormal de bloc** et l'appliquent à un cas de pollution radiologique pour en délimiter les secteurs à excaver (Americium, Nevada, USA).

6.1.4. Méthodes ou démarches géostatistiques répondant à des besoins particuliers

Plusieurs articles concernent le développement ou le test de méthodes géostatistiques répondant à des situations bien particulières.

- Certaines pollutions de sol sont issues de la dissémination aérienne de poussières à partir d'un point-source. (Saito & Goovaerts, 2001) appliquent une **variante du krigeage avec dérive** à deux sites dans cette situation (fonderies responsables de pollutions au Pb dans la région de Dallas et de pollutions au cadmium à Palmerton, USA). La dérive est considérée, non pas comme un polynôme de faible degré fonction des coordonnées, comme cela est pratiqué usuellement, mais comme une fonction des deux principaux facteurs influençant la répartition spatiale de la pollution : la distance par rapport à la fonderie et la direction des vents principaux. La combinaison de cette dérive et du krigeage des résidus produit un modèle réaliste de la contamination.
- Les pollutions de sédiments sont le résultat de phénomènes de dissémination complexes guidés par les méandres des cours d'eau. La continuité spatiale des pollutions doit dans ce cas être étudiée dans un système de coordonnées curvilignes. Après transformation des coordonnées, (Alary & Demougeot-Renard, 2010) ont appliqué une **variante du krigeage factoriel** pour cartographier de manière séparée les différentes fonctions élémentaires constitutives des modèles de variogramme, lorsqu'une signification physique pouvait être associée à chacune d'entre elles. L'application de cette méthode aux concentrations en Cd et Zn des sédiments de la rivière de la Scarpe (Nord, France) a permis de mettre en relation une fonction de courte portée avec des « hotspots » interprétés comme des rejets ponctuels industriels et urbains, et une fonction de longue portée avec le dépôt de matériaux en suspension dans les zones de ralentissement du courant (méandre, écluse).
- Une **analyse par krigeage factoriel** a été menée de manière similaire par (Lin, Chang, Shih, & Tseng, 2002) sur une large région agricole (Taïwan). La variation spatiale de courte portée en métaux est apparue comme liée aux multiples activités industrielles du secteur, tandis que la variation de longue portée a pu être associée au système d'irrigation dans lequel les industries rejettent leurs eaux usées.

- Dans le cadre de la cartographie des concentrations en Cd du sol du territoire français, les auteurs (Marchant, Tye, & Rawlins, 2011) se retrouvent confrontés à un problème similaire de superposition de phénomènes à différentes échelles. L'objectif dans leur cas est de produire une estimation robuste de la pollution du sol, assortie d'une incertitude d'estimation fiable. Trois types de variations, d'échelle différentes, sont identifiés : variations naturelles liées à la géologie du matériau parent (bruit de fond naturel), variations naturelles ou anthropiques à l'intérieur de chaque matériau parent, et variations liées à des anomalies ponctuelles. Les auteurs proposent un **modèle linéaire hybride** à composantes fixes et aléatoires (modélisées par krigeage) pour tenir compte de ces trois échelles.

La géostatistique recouvre un grand nombre de méthodes et techniques, qui se mettent en œuvre selon le type de phénomène à modéliser. Se pose alors la question du choix de la méthode. En général, le géostatisticien sélectionne la technique qui lui paraît la plus adaptée au problème qui lui est posé. Mais il peut également être amené à tester plusieurs techniques qui semblent a priori toutes adaptées au problème, puis mener une analyse de sensibilité pour déterminer laquelle est la plus pertinente.

6.2. Combinaison de la géostatistique à d'autres modèles

La combinaison de la géostatistique à d'autres modèles permet d'y intégrer la variabilité spatiale des phénomènes étudiés.

- Les résultats obtenus par krigeage lognormal de la contamination en métaux du sol d'une région (Cd, CH) sont utilisés dans un **modèle multicritère** pour aider à décider du choix d'une technique de dépollution. La géostatistique permet ici d'intégrer la variabilité spatiale de la pollution du sol dans le processus de décision. De manière similaire mais sur un cas de contamination de nappe, (Wang & McTernan, 2002) couplent des simulations de la variable d'intérêt à un modèle multicritère pour définir une solution de dépollution optimale (site Superfund, USA).
- (Zhang, Li, & Achari, 2009) proposent de combiner la géostatistique à la **logique floue** pour intégrer dans un modèle, non seulement la variabilité spatiale d'un phénomène de pollution, mais également l'incertitude affectant les données. Les variables seraient ainsi représentées par des modèles de distribution classiques ou bien des nombres flous selon le niveau de précision des données. Cette méthode combinée a été testée sur un cas d'étude par les auteurs. Une méthode hybride comparable a déjà été proposée par (Guyonnet, Bourguin, et al., 2003).
- La géostatistique peut être également couplée à une **analyse de risques sanitaires**. L'incertitude liée à la variabilité spatiale de la pollution, modélisée par géostatistique, se cumule alors avec les autres sources d'incertitudes issues des paramètres et variables (non spatialisées) d'entrée des modèles d'évaluation quantitative des risques. A l'heure actuelle, très peu de modèle de risques sont capables de quantifier ces diverses sources d'incertitudes (cas du modèle CLEA évoqué ci-dessous). La géostatistique est ainsi intégrée à la démarche d'évaluation des risques de sites Superfund par (Thayer, Griffith, Goodrum, Diamond, & Hassett, 2003) pour estimer la concentration ponctuelle d'exposition (EPC) : concentration en substance chimique à laquelle un récepteur est exposé sur une durée et une aire géographique (Exposure Unit) prédéfinies. Des simulations des concentrations en Pb d'un site Superfund sont générées pour calculer des probabilités de dépassement de seuil.
- (Maxwell, Carle, & Tompson, 2008) couplent un modèle géostatistique d'un réservoir aquifère (simulations d'hydrofaciès), un **modèle d'écoulement et de transport** de perchloréthylène et un **modèle d'évaluation de risque sanitaire** pour intégrer l'incertitude affectant les paramètres de calcul ainsi que la variabilité spatiale, temporelle et individuelle (personnes exposées) des variables d'intérêt dans l'estimation du risque associé à un cas synthétique de contamination en nappe (sur base de données hydrogéologiques réelles du site Superfund de Livermore, Californie).
- De manière similaire, (Gay & Korre, 2006) et (Gay & Korre, 2009) combinent des simulations de concentrations en métaux dans les sols au modèle de calcul des risques **CLEA** (Contaminated Land Exposure Assessment) pour évaluer les risques d'exposition au cadmium par la consommation de végétaux. Les auteurs (Chen, Wang, Wu, Zhu, & Zhou, 2011) ont réalisé une étude similaire en Chine.

6.3. Comparaison de la géostatistique à d'autres méthodes d'estimation probabiliste

Plusieurs auteurs confrontent les techniques géostatistiques conventionnelles à d'autres méthodes d'estimations spatio-temporelles.

- Ainsi, l'approche par **chaîne de Markov/probabilité de transition (CM/PT)** est comparée à un krigeage ordinaire pour estimer la répartition spatiale de la zone source d'un aquifère (saturations et concentrations en DNAPL dans le panache (Maji, Sudicky, Panday, & Teutsch, 2006)). Les performances des deux méthodes ont pu être testées sur un site connu de manière exhaustive grâce à une caractérisation intensive (site-pilote de l'Université de Tübingen, Allemagne) : le krigeage montre un effet de lissage plus prononcé que le CM/PT, tandis que les volumes et masses de DNAPL sous forme solubles estimés par géostatistique apparaissent plus éloignés des quantités réelles. Les besoins en ressources informatiques sont en revanche plus élevés avec l'approche CM/PT. Cette dernière gagnerait en outre à être comparée à des simulations géostatistiques, qui n'engendreront pas le lissage observé sur le krigeage.
- Les variations spatio-temporelles de la conductivité électrique et de la teneur en chlorures d'un aquifère sont modélisées à l'aide de **réseaux de neurones artificiels, adaptive neuro-fuzzy Inference system (ANFIS)** et krigeage (Farahmand, Manshouri, Liaghat, & Sedghi, 2010). Les performances les meilleures seraient obtenues avec la méthode ANFIS (critères de comparaison non connus).
- (Schnabel & Tietje, 2003) proposent une alternative aux méthodes géostatistiques utilisées dans les systèmes d'information géographique (SIG) pour 1) tenir compte de l'interdépendance entre variables représentées sous forme de différentes couches et 2) contourner les hypothèses de stationnarité et de variable gaussienne requises par de nombreuses méthodes géostatistiques. Les résultats d'**interpolation Mollifier** (méthode de régression spatiale multidimensionnelle) sont testés sur des données de concentrations en métaux dans les sols d'une région suisse et comparés à ceux obtenus par krigeage lognormal. Les relations entre métaux et autres paramètres (ex. pH, utilisation du sol) représentés sous différentes couches dans un SIG sont ainsi étudiées.

6.4. Optimisation des schémas d'échantillonnage

L'optimisation de l'échantillonnage des sites contaminés fait l'objet d'une abondante littérature depuis de nombreuses années. L'accent se porte sur la recherche d'un optimum en termes de nombre, de phase et de répartition des échantillons lorsqu'une modélisation géostatistique est en jeu. Nous ne parlerons donc pas ici des questions relatives à la prise d'échantillons.

D'un point de vue purement mathématique, l'optimisation revient à déterminer le meilleur élément d'un ensemble de solutions, sur la base d'un certain nombre de critères quantitatifs. Elle consiste généralement à définir une fonction-objectif qui doit être minimisée. De manière plus pragmatique dans le domaine des sites pollués, l'optimisation de l'échantillonnage consiste à établir une stratégie qui réponde à un objectif donné. Le niveau de complexité des voies d'optimisation des schémas d'échantillonnage proposés durant les dix dernières années apparaît très variable.

- Certains auteurs recherchent simplement comment capter « au mieux » la structure spatiale de la pollution. L'échantillonnage vise dans ce cas à disposer d'un nombre suffisant de couples de points pour différentes distances de séparation, pour que le variogramme expérimental puisse révéler « au mieux » la continuité spatiale du phénomène. Un échantillonnage stratifié systématique aléatoire, consistant à collecter des données selon une grille à maille carrée, puis à des distances de plus en plus petites dans des directions aléatoires est recommandé par (Andronikov, Davidson, & Spiers, 2000). Il permet de montrer qu'un ensemble de 50 à 60 données sur un ancien site industriel de 6.25 ha (écossais) est nécessaire et suffisant pour capter la structure spatiale d'une pollution des sols aux métaux lourds (cas 2D).

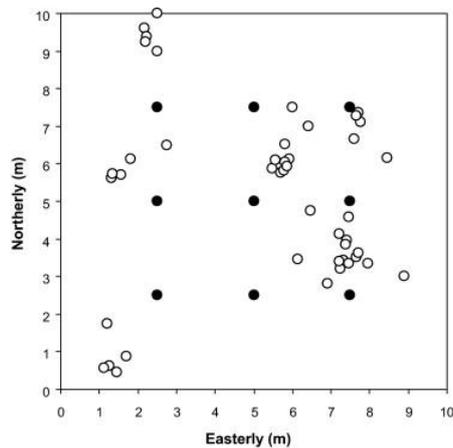


Figure 48 : Exemple de schéma d'échantillonnage stratifié systématique aléatoire.

- De nombreux auteurs cherchent à réduire l'incertitude affectant les valeurs estimées de pollution à partir de cartes obtenues par krigeage (simple ou ordinaire). Des données supplémentaires sont positionnées dans les secteurs de plus forte variance de krigeage dans l'objectif de la minimiser (Van Groenigen, Siderius, & Stein, 1999). Mais cet objectif est souvent inadapté à la problématique des sites pollués où il s'agit, en général, de réduire l'incertitude sur la classification des sols par-rapport à des valeurs-seuils.
- Plusieurs auteurs testent de fait des méthodes visant à réduire ces erreurs de classification.
 - o (Goovaerts & Van Meirvenne, 2001; Van Meirvenne & Goovaerts, 2001) utilisent la méthode du krigeage d'indicatrices pour obtenir une distribution (histogramme) des concentrations en Cd en tout point d'un sol pollué (216 km² atteints par les émanations d'anciennes fonderies, en Belgique) : un meilleur estimateur de la concentration et la probabilité de dépassement du seuil peuvent être déduits de ces distributions en chaque point du site. Le positionnement de 50 nouveaux points d'échantillonnage est optimisé en recherchant les secteurs où la variance des différences relatives entre la concentration en polluant et la valeur-seuil est élevée. Cette variance est grande lorsque la concentration en polluant est proche de la valeur-seuil, c'est-à-dire lorsque l'incertitude sur le dépassement du seuil est élevé. Ce critère aboutit à un positionnement des nouveaux points dans les zones frontières entre les secteurs considérés comme « sains » (faibles probabilités de dépassement du seuil) et ceux considérés comme « pollués » (fortes probabilités de dépassement du seuil).
 - o (Juang, Lee, & Teng, 2005) proposent un échantillonnage en phases adapté à partir d'une carte de valeurs krigées (adaptive clustering sampling), sans utiliser les variances de krigeage. Sur la base d'un premier ensemble d'échantillons disposés aléatoirement dans le domaine d'étude, une fonction de distribution calculée à partir des statistiques de rang⁹ renseigne sur la probabilité d'erreur de classification par-rapport au seuil. Sur la base de cette fonction, la position des échantillons d'une nouvelle phase d'investigation est déterminée en sélectionnant les valeurs de la carte krigée montrant les plus fortes probabilités d'erreurs de classification. La méthode a été testée sur un sol pollué au cuivre de 340 ha, en Taïwan.
 - o (H. Demougeot-Renard, de Fouquet, & Fritsch, 2004; H. Demougeot-Renard, de Fouquet, & Renard, 2004) développent une méthode visant à prévoir l'effet d'un échantillonnage supplémentaire sur la réduction d'incertitude sur les estimations de volumes et de coûts de dépollution. Une première phase d'échantillonnage permet de calculer un premier ensemble de simulations conditionnelles de la pollution, à partir desquelles sont établies des cartes de probabilité de dépassement de seuils et des estimations de volumes et de coûts. Une des simulations est utilisée pour « simuler » la collecte de données supplémentaires (dans les zones de probabilités intermédiaires, correspondant aux plus grands risques d'erreurs de classification) et les rajouter fictivement au jeu de données de la première phase. Les calculs de volumes et de coûts sont ensuite répétés et comparés. La « simulation » d'une deuxième phase d'échantillonnage est répétée pour des nombre croissants de

⁹ Cumulative distributive function of order statistics (CDFOS).

données. L'impact sur la réduction de l'incertitude affectant les estimations de volumes et de coûts permet de définir un nombre « optimal » d'échantillons pour cette phase supplémentaire.

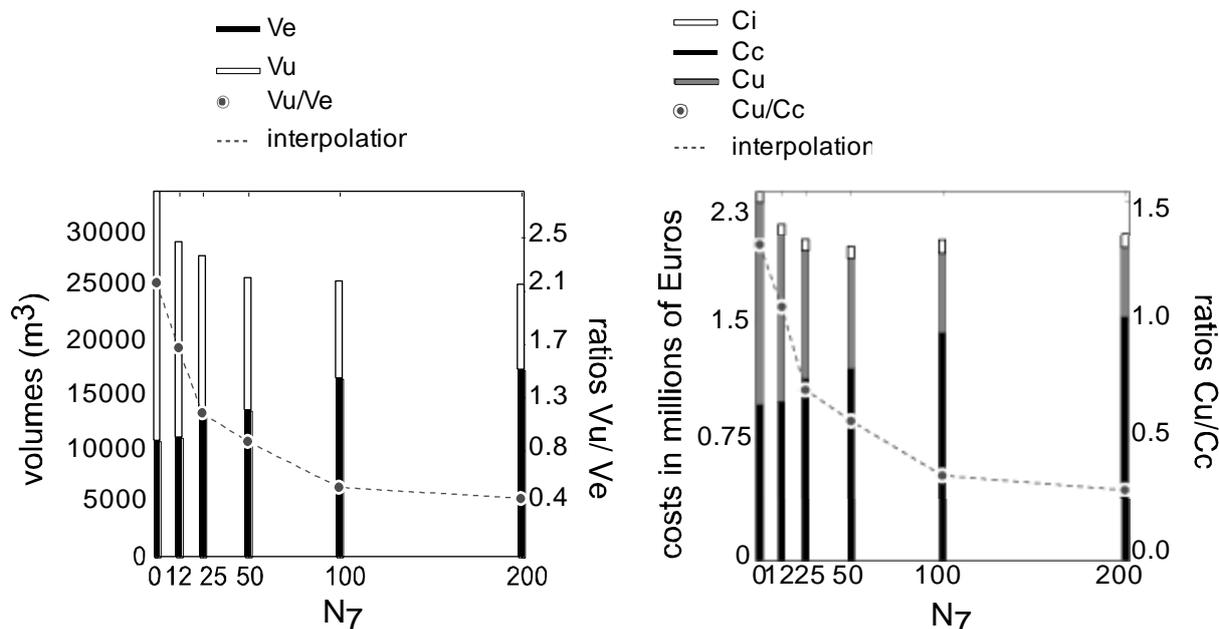


Figure 49 : Prévisions des volumes (droite) et des coûts (droite) en fonction du nombre d'échantillons supplémentaires (N_7) collectés sur un site pollué déjà investigué (cas d'une ancienne fonderie, pollution des sols au Pb). V_e : volume à dépolluer, V_u : volume incertain, C_i : coût d'investigation, C_e : coût de dépollution, C_u : coût incertain (H. Demougeot-Renard, de Fouquet, & Renard, 2004).

- (Verstraete & Van Meirvenne, 2008) démontrent la possibilité de limiter le nombre d'échantillons collectés tout en augmentant la précision de la carte de classification des sols par-rapport aux seuils, sur une friche industrielle belge de 5 ha qui avait été échantillonnée de manière extrêmement dense (240 échantillons au stade investigation, 1005 échantillons avant dépollution). Les 240 échantillons de la phase d'investigation sont utilisés pour générer un ensemble de simulations conditionnelles des concentrations au Pb. Sur cette base sont calculés en chaque point du domaine la probabilité de dépassement du seuil, un meilleur estimateur de la concentration en Pb et son coefficient de variation (proches respectivement de la valeur krigée en Pb et de l'écart-type de krigeage lorsque le nombre de simulations est suffisamment grand). A l'aide d'une partie du jeu de données collectées réellement avant dépollution, les auteurs simulent la collecte d'échantillons supplémentaires par phases successives de 25, avec 3 critères d'optimisation : les 25 échantillons doivent être collectés a) dans les zones de probabilités intermédiaires comprises entre 0.2 et 0.8 (risques élevés d'erreurs de classification), b) aux points présentant les plus forts coefficients de variation et c) les plus fortes valeurs estimées de concentration. Ces critères garantissent le positionnement dans les zones de plus grande incertitude sur la valeur estimée et la classification par-rapport au seuil. Les auteurs démontrent que 125 échantillons collectés en 5 étapes de 25 selon ces critères auraient été suffisants pour compléter les 240 échantillons de la phase d'investigation et délimiter la pollution avec une précision suffisante.
- (Bechler et al, 2012) compare l'efficacité de plusieurs algorithmes d'optimisation d'échantillonnage dans le cas d'installations potentiellement contaminées par des substances radiologiques. Deux algorithmes sont comparés : l'algorithme glouton, qui consiste à ajouter séquentiellement un point de mesure à l'emplacement optimal, ainsi que le recuit simulé, qui demande une paramétrisation plus complexe mais permet de positionner directement l'ensemble des points à ajouter. L'optimisation vise à minimiser une fonction objectif qui peut varier selon le cas d'application : minimiser l'incertitude moyenne associée au krigeage (variance de krigeage), minimiser la

largeur d'un intervalle de confiance associé à l'estimation, minimiser le risque de faux négatif (déclarer à tort comme saine une zone qui s'avérerait en fait contaminée).

- D'autres auteurs cherchent simplement à comparer différentes stratégies d'échantillonnage et à en évaluer l'effet sur les cartes de classification des sols par-rapport à des seuils. De cette façon, (Chu, Lin, Jang, & Chang, 2010) appliquent un krigeage d'indicateurs à un cas de pollution multiple en Taïwan pour comparer un échantillonnage aléatoire à un échantillonnage hypercube latin de dimension variable (nombre croissant d'échantillons). Cet échantillonnage semble assurer un meilleur recouvrement du domaine d'étude, et par suite une classification plus fiable des sols par-rapport aux seuils.
- Le développement croissant d'appareils de mesure de terrain a conduit certains auteurs à étudier de nouvelles stratégies d'échantillonnage où le nombre et la position des points supplémentaires sont adaptés « en temps réel », au fur et à mesure de l'acquisition des données. Les données acquises par les outils de terrain sont cependant généralement moins précises que les mesures de laboratoire, ce qui conduit à les considérer comme des informations auxiliaires (cf. chapitre 4).
 - o En première approche, (D'Or, 2005) étudie de manière théorique la possibilité d'optimiser le nombre de mesures sur site sur un cas synthétique, en se basant sur un jeu de simulations conditionnelles de la pollution et le calcul de probabilités de dépassement de seuil comme déjà évoqué ci-dessus. L'imprécision des mesures sur site est modélisée à l'aide d'une approche BME¹⁰.
 - o Une démarche de couplage des méthodes géostatistiques et des analyseurs de terrain a été développée et testée sur un site réel dans le cadre d'un projet de recherche subventionné par l'ADEME (projets OUTRAGE et REPERAGE, (H Demougeot-Renard et al., 2008). La démarche prévoit une phase d'échantillonnage préliminaire où des mesures sur site et des analyses de laboratoire sont réalisées sur les mêmes échantillons disposés selon un schéma régulier. Cette phase permet d'établir la relation entre mesures sur site et analyses de laboratoire qui permettra, dans les phases d'échantillonnage ultérieures, de déduire des « équivalents-laboratoires » à partir de seules mesures de terrain. Elle est également destinée à établir un premier modèle géostatistique de classification des sols par-rapport aux seuils (sur base de co-simulations 2D ou 3D des concentrations en polluants), et d'en déduire un positionnement optimisé des échantillons de la phase suivante, selon un schéma régulier dans les zones de probabilités intermédiaires de dépassement des seuils (associées aux plus grands risques d'erreurs de classification). La phase préliminaire est suivie d'une série de phases successives et journalières d'échantillonnage : les échantillons sont collectés durant la journée, les données sont transmises au géostatisticien le soir pour une mise à jour du modèle géostatistique et la fourniture du positionnement optimisé des échantillons collectés le lendemain. La mise en œuvre de la démarche s'appuie sur un programme Matlab (The MathworksTM) développé spécifiquement pour ce besoin. La démarche a été développée et testée sur un cas de pollution des sols 2D (contamination des sols au Pb dans le secteur de l'ancien site Metaleurop du Nord de la France), puis mise en œuvre en temps réel sur un ancien site sidérurgique wallon (Belgique) (site Henricot II, pollution aux métaux lourds Cu, Ni, Pb, Zn, cas 3D). La démarche a permis de collecter plusieurs centaines de mesures sur site en 5 jours, en les positionnant dans les zones de plus forte incertitude sur la classification. Elle permet ainsi de réduire au maximum l'incertitude sur les cartes de classification des sols, et par suite sur les estimations de volumes et de coûts de dépollution associés.

¹⁰ Bayesian Maximum Entropy.

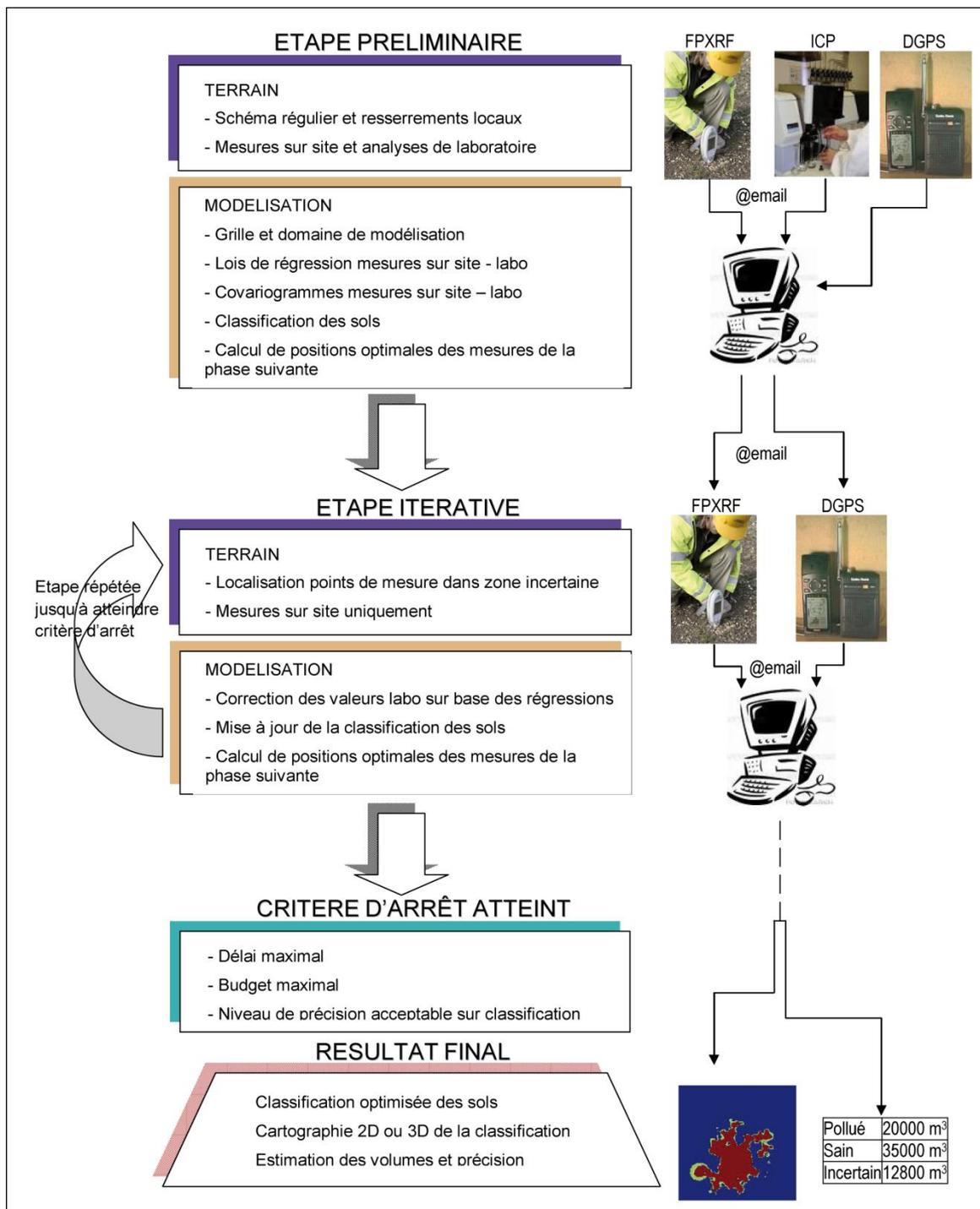


Figure 50 : Les étapes de la démarche REPERAGE de couplage de méthodes géostatistiques et de mesures sur site (H Demougeot-Renard et al., 2008).

6.5. Tests de validité de la géostatistique

La mise en œuvre d'une technique de modélisation pour reproduire un phénomène qui n'est connu que partiellement, par quelques points de données, et de manière imparfaite, les données étant entachées d'erreurs (cf. p.ex. (Myers, 1997)), pose généralement la question de l'écart entre le modèle et la réalité. Cette question n'est pas triviale car elle exige une définition précise de ce qui va être comparé (quels éléments du modèle sont confrontés à la réalité ? qu'est-ce qui est considéré comme la « réalité » ?), des critères de comparaison, et des valeurs acceptées trouvées pour ces critères. Il est de plus souvent difficile de disposer librement de données de diagnostic et de dépollution permettant de mener un retour d'expérience sur l'ensemble des estimations réalisées avant les travaux effectifs de réhabilitation.

- En première approche, la validation la plus naturelle consisterait à confronter les résultats obtenus à partir de données d'investigation, cartes de classification des sols et volumes estimés, aux résultats de la dépollution réelle, zones apparues comme polluées sur le terrain et volumes et tonnages de matériaux traités. Ce type de validation nécessite néanmoins une modélisation très méticuleuse des conditions effectives de tri et d'excavation des matériaux, et une bonne fiabilité des données acquises en cours de dépollution et censées représenter la réalité.
 - o Ce type de comparaison a été réalisé par (H. Demougeot-Renard & De Fouquet, 2004) sur un cas de pollution du sol au Pb (ancienne fonderie, cas 2D). La validité du modèle géostatistique a été démontrée dans les zones qui avaient été renseignées en cours de dépollution, moyennant une reproduction très fine par le modèle du support des données de dépollution.
 - o (Fauchaux & Jeannée, 2012) ont pu réaliser une validation du modèle géostatistique sur un site TOTAL. Cette étude fait notamment partie des études de démonstration Geosipol (Geosipol, 2012). 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). 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. 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. Dans le cas présent, le premier volume calculé était de 9 200 m³ alors que le volume excavé est de 13 171 m³.

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 m³ est en effet proche de la valeur estimée comme étant la plus probable (12 059 m³), correspond au quantile 25% des valeurs estimées et est donc largement inclus dans l'intervalle de confiance à 90% construit à partir des estimations : [10 028 ; 15 421] m³. 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 m³ et 31 239 m³ est réalisé. Cet intervalle comprend le volume réel excavé de 22 348 m³. 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.

- Une seconde approche est assez couramment employée par les géostatisticiens lorsqu'un ensemble de données très dense est disponible sur un site. Elle consiste à diviser le jeu de données en deux, pour réaliser une modélisation géostatistique à partir du premier sous-ensemble et la comparer aux données du second sous-ensemble (sous-ensemble de validation). Cette approche se prête bien à une confrontation des valeurs estimées localement, au niveau des points d'échantillonnage du second sous-ensemble. Cette technique a par exemple été employée par (Verstraete & Van Meirvenne, 2008) pour comparer les différentes valeurs estimées aux valeurs mesurées du sous-ensemble de validation, en calculant l'erreur quadratique moyenne *RMSEE* suivante:

$$RMSEE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z^*(x_i) - Z(x_i)]^2}$$

où n désigne le nombre de données de validation, $Z^*(x_i)$ la valeur estimée par modélisation et $Z(x_i)$ la valeur mesurée du sous-ensemble de validation. La modélisation est d'autant plus proche des valeurs réellement mesurées que l'erreur quadratique est petite. C'est sur la base de ce critère que les auteurs ont déterminé un schéma d'échantillonnage optimum (cf. § 6.4).

- Quelques auteurs ne cherchent pas des critères quantitatifs de comparaison du modèle à la réalité, mais apprécient de manière qualitative l'applicabilité de la géostatistique dans des situations concrètes, ainsi que son intérêt commercial.
 - o (Glavin & Hooda, 2005) testent un krigeage (méthode non précisée) sur les données d'un ancien site industriel complexe (dépassement de seuils par 6 métaux lourds) pour délimiter les zones contaminées et concevoir un plan de dépollution. Les auteurs constatent que le modèle obtenu ne permet pas d'éviter la découverte de « hotspots » en cours de dépollution. L'utilisation commerciale de la géostatistique est jugée difficile du fait du grand nombre de données requises pour disposer d'un modèle suffisamment précis.
 - o Une conclusion similaire est tirée par (Samuel-Rosa, Dalmolin, & Pedron, 2011) d'une étude géostatistique des données de caractérisation du sol de couvertures de décharges urbaines (Brésil). L'étude géostatistique apparaît coûteuse en raison du grand nombre de données requis. Les auteurs préfèrent une analyse statistique en composantes principales (ACP) couplée à une analyse de groupe (cluster analysis), qui leur permet de définir des zones géographiques homogènes de gestion de la couverture.

6.6. La géostatistique pour évaluer les flux massiques de polluants

Un ensemble de six articles très récents, postérieurs à 2007, traitent de l'application de la géostatistique à l'estimation de flux massiques de polluants en nappe au travers d'un transect, souvent en aval d'un site pollué (Cai, Wilson, Cardiff, & Kitanidis, 2011; Dehnert, Leven, Trabitzsch, & Weiss, 2010; Hosseini, Deutsch, Biggar, & Mendoza, 2010; Li, Goovaerts, & Abriola, 2007; Pantazidou & Liu, 2008; Schwede & Cirpka, 2010). Cette tendance est révélatrice de l'intérêt croissant pour l'évaluation de l'impact d'un site en termes de flux, et non plus seulement en termes de concentrations ou de masse de polluants dans la zone source et son panache. L'utilisation croissante de dispositifs « multilevel » permet de multiplier les échantillons prélevés ou les mesures de terrain sur un sondage, et de capter ainsi la variabilité spatiale d'une pollution à l'échelle décimétrique ou centimétrique. Ces dispositifs sont particulièrement intéressants pour caractériser les pollutions aux hydrocarbures chlorés réputés pour leur complexité de répartition à petite échelle, mais contribuent à augmenter fortement le nombre de données disponibles. L'utilisation de la géostatistique permet d'intégrer l'ensemble de ces données dans un modèle cohérent. Ces techniques permettent en outre de comparer l'effet de différents schémas d'échantillonnage sur l'incertitude de la cartographie du flux obtenue (Cai et al., 2011).

6.7. Synthèse

L'étude des derniers travaux de recherche ayant trait à l'application de la géostatistique aux sites et sols pollués met en valeur les tendances suivantes.

- Les démarches géostatistiques adaptées aux questions soulevées par les sites et sols pollués sont désormais bien établies. Les efforts de recherche actuels sont menés pour raffiner les méthodes existantes et trouver des solutions aux quelques problèmes subsistant.
- Quelques comparaisons de la géostatistique à des méthodes émergentes de modélisation spatio-temporelles ont été menées durant les dernières années, mais sans démonstration probante de la supériorité d'une méthode par rapport à l'autre.
- Le couplage de la géostatistique à d'autres modèles utiles à l'évaluation des sites pollués a été testé et met en valeur son intérêt pour y intégrer l'incertitude liée à la variabilité spatiale de la pollution, que ce soit dans les évaluations de risque sanitaire, les modélisations des écoulements et transport des polluants ou les analyses multicritères aidant au choix du projet de dépollution.
- De nombreux travaux ont été consacrés à la recherche de stratégies d'échantillonnage optimisées, s'appuyant sur un modèle géostatistique permettant de quantifier les incertitudes locales (cartographiques) ou globales pour positionner « au mieux » des points d'échantillonnage supplémentaires. L'utilisation conjointe des mesures rapides sur site et des techniques géostatistiques permet d'envisager des campagnes d'investigation rapides où le nombre de données collectées est multiplié et leur positionnement optimisé, tout en convergeant vers une meilleure précision des cartes de pollution et des estimations des quantités de matériaux pollués.
- Les tests de validité visant à confronter les modèles géostatistiques à la réalité sont peu nombreux dans la littérature, probablement en partie du fait de la difficulté de la question posée et de la rareté des jeux de données accessibles le permettant. Les quelques exemples disponibles mettent en évidence une bonne cohérence entre le modèle et la réalité, sous réserve d'une reproduction très fine par le modèle des données censées reproduire la réalité.
- L'application de la géostatistique pour modéliser le flux massique de polluant au travers d'un transect apparaît comme un domaine émergent des cinq dernières années. Il accompagne la tendance actuelle à caractériser à petite échelle les flux des polluants dont la répartition spatiale varie à l'échelle décimétrique ou centimétrique, tels que les hydrocarbures chlorés.

7. L'enquête auprès des professionnels

7.1. Présentation de l'enquête

Un questionnaire a été établi afin d'obtenir un retour d'expérience sur la perception qu'ont de la mise en œuvre de la géostatistique les acteurs impliqués dans la gestion des sites et sols pollués. Après validation par le comité de suivi du projet, le questionnaire a été transmis, à la fois en français et en anglais, à une base de plus de cent contacts des auteurs de l'étude. Une version anglaise allégée a également été distribuée par l'intermédiaire de Dominique Darmendrail (BRGM) au sein des membres du réseau NICOLE et du Common Forum.

Les questionnaires sont reproduits dans l'Annexe A, tout comme la liste des personnes y ayant répondu. Ils ont été bâtis de façon à pouvoir comprendre, en fonction du type d'acteur répondant, quelle est son utilisation de la géostatistique (expertise interne, sous-traitance, confrontation en tant qu'autorité...), sa perception de l'utilité de cette approche ainsi que sa vision des recommandations et perspectives qui permettraient selon lui d'en optimiser l'efficacité.

En outre, des « fiches site » ont été transmises afin d'observer des cas concrets d'utilisation de la géostatistique et d'obtenir si possible quelques cas valorisables sous forme d'exemples dans la présente étude. Ces « fiches sites » sont présentées au paragraphe 7.2.5, et certaines d'entre elles ont pu être détaillées au chapitre 8.

7.2. Synthèse des résultats de l'enquête

Cette synthèse, qui se veut factuelle, laisse peu de place à l'interprétation qui sera quant à elle réalisée au chapitre 9.

7.2.1. Typologie des réponses reçues

A l'issue de l'enquête, 27 réponses sont parvenues de la part d'acteurs qui ont été confrontés à des études géostatistiques. Au moins 5 réponses d'acteurs n'ayant jamais été confrontés à ce type d'études ont de plus été recensés. 2 réponses, parvenues tardivement, ne sont pas intégrées à la synthèse ci-dessous. La cohérence de ces réponses par rapport à la synthèse à néanmoins été vérifiée.

Parmi les 25 réponses synthétisées, 3 sont issues des réseaux NICOLE et du Common Forum. La répartition des pays d'où émanent les réponses est reprise au Tableau 9. La plupart des personnes ayant répondu sont en France puis viennent la Suisse et la Belgique ; une attention particulière sera néanmoins accordée aux réponses émanant de pays plus « lointains », parmi lesquelles celle de P. O'Seasnain de l'Environmental Protection Agency en Irlande et celle d'A. Paquet du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP, Québec) qui détaille la situation du pays.

Tableau 9 : Provenance par pays des réponses au questionnaire (acteurs ayant été confrontés à des études géostatistiques).

France	Suisse	Belgique	Canada	Brésil	Irlande
14	5	3	1	1	1

La mission des organismes de rattachement des personnes répondantes est variée comme le montre la Figure 51 ; la plupart des organismes remplissent plusieurs rôles. La réalisation d'études et les missions de conseils et expertises sont les rôles les plus fréquents, 23 réponses sur les 25 citant ce type d'activité. Celle-ci s'accompagne la plupart du temps d'un rôle dans la prescription, l'évaluation et les contrôle des études et mesures ou dans la réalisation de travaux de dépollution. Les donneurs d'ordre sont moins nombreux, cités 4 fois.

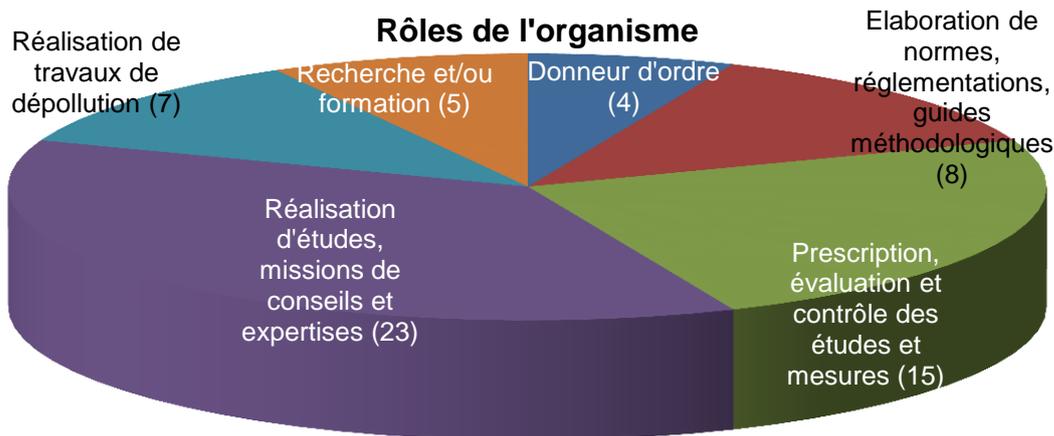


Figure 51 : Rôles des organismes ayant répondu à l'enquête (réponse multiple possible).

7.2.2.L'utilisation de la géostatistique

La seconde partie du questionnaire retranscrit les modes d'utilisation de la géostatistique ainsi que le nombre de fois où des études ont été rencontrées ou réalisées par les acteurs. Les deux figures suivantes reprennent ces résultats. La Figure 52 montre deux prépondérances (modes) avec soit des personnes qui ont vu peu d'études (moins de 5) soit des personnes qui ont vu beaucoup d'études (plus de 10) ; selon les cas, ces résultats sont à lier au nombre d'années depuis lequel ces personnes côtoient la géostatistique, ou à la taille de l'organisme pour lequel les personnes travaillent. La Figure 52 montre qu'une grande partie des acteurs réalise au moins de temps en temps des études en interne, cela ne l'empêchant pas de faire appel à la géostatistique par le biais de commandes lorsque l'acteur est un donneur d'ordre, de sous-traitances lorsque l'acteur est un bureau de consultants, ou en y étant confrontés dans le cadre de l'évaluation ou de l'expertise d'études. Les trois combinaisons de réponses les plus fréquentes données à cette question sont :

- Réalisation à l'aide de compétences internes uniquement pour 6 personnes ;
- Commande (décideur), réalisation, sous-traitance (bureau d'études) et confrontation pour 3 personnes ;
- Réalisation et sous-traitance pour 4 personnes.

De manière générale on observe que les personnes ayant rencontré ou réalisé plus de 10 études, ont au moins réalisé elles-mêmes une partie de ces études. Pour les personnes connaissant entre 1 et 5 cas, les études ont souvent été soit sous-traitées soit réalisées en interne (6 et 5 occurrences respectivement).

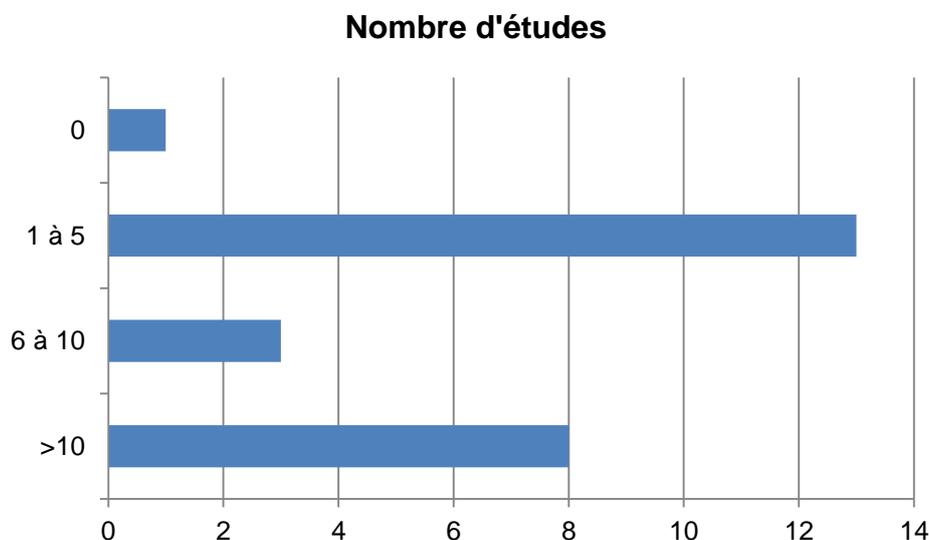


Figure 52 : Nombre d'études rencontrées ou réalisées pour lesquelles la géostatistique a été utilisée.

Utilisation de la géostatistique

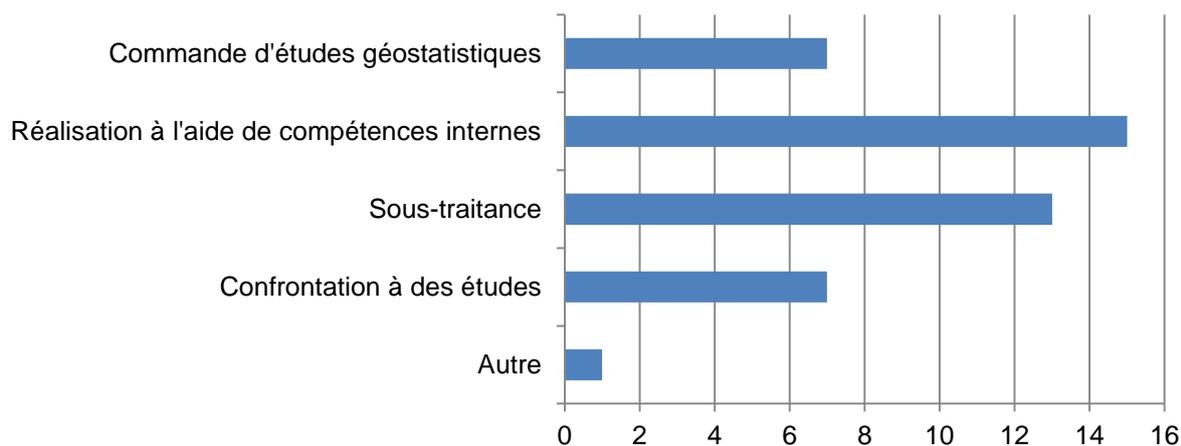


Figure 53 : Contexte d'utilisation de la géostatistique par les différents acteurs.

7.2.3. Bilan de l'emploi de la géostatistique, freins et améliorations mis en évidence

Le bilan global des études pour lesquelles la géostatistique a été employée est de manière générale positif (Figure 54). Il ne s'agit la plupart du temps pas de succès complets mais la géostatistique a su répondre aux questions posées. Les principales raisons évoquées pour ces différents bilans sont les suivantes :

- bon équilibre coût / bénéfice d'une étude géostatistique (T. Gisbert, Arcadis),
- représentations en 2D ou 3D permettant d'illustrer les exposés et de mieux communiquer,
- utilisation à différents stades : de l'optimisation des échantillonnages à la quantification des traitements à réaliser,
- demande d'une quantité importante de données et problèmes fréquents de structuration des données, dont il est jugé qu'ils ne sont pas optimisés pour la géostatistique,
- grandes incertitudes associées aux résultats, à associer au point précédent.

Les commentaires suivants constituent des synthèses intéressantes des différents bilans reçus :

- P. Pouget-Abadie d'URS France : « *Il s'agit d'une bonne approche complémentaire aux approches déterministes classiques pour : 1) évaluer les volumes de terres devant faire l'objet de travaux de réhabilitation dans le cas de chantiers d'envergure en vue de quantifier les risques potentiels et l'impact financier associé ; 2) évaluer l'exhaustivité des travaux mis en œuvre et le risque sanitaire associé au dépassement d'un objectif de réhabilitation.* »
- G. Plassart de Neodyme Envisol : « *La géostatistique nous permet d'acquérir une meilleure précision lors de la détermination de volumes de pollutions, le dimensionnement de sources, par rapport à des pratiques plus classiques.* »

Ce bilan fait aussi apparaître la nécessité d'avoir une contamination « adaptée » à un traitement géostatistique aussi bien concernant la structure de la pollution que sa caractérisation (site et données) :

- « *The geostatistical method which has been used, resulted in quite accurate estimations of concentrations of contaminants. The conditions of the contaminated site, have been proven to be good conditions for applying a geostatistical method. For example the contamination was spread by air and therefore distributed quite homogeneously. The most important wind directions were successfully integrated in the geostatistical method.* » de E. Van Dyck de l'OVAM (Public Waste Agency of Flanders, Belgique) ;
- « *Le bilan est positif pour des objectifs de visualisation des données (cartographie d'interpolation et incertitudes p.ex.) ou d'optimisation d'un nouveau diagnostic sur la base de diagnostics de pollution précédents. Par contre, les objectifs de délimitation des surfaces ou des volumes (3D) pollués (au-delà d'un seuil), le couplage pollution/lithologie ou pollution des sols / pollution de l'eau de nappe p.ex. se heurtent souvent à des problèmes liés à la structure des données (espace 3D, densité et homogénéité du maillage...). Plus généralement, les diagnostics de pollution sol sont*

très souvent orientés et le réseau de mesures (même dense) n'est donc pas très représentatif pour l'outil géostatistique. » de S. Kaskassian de Burgeap.

Enfin, B. Beuthe de la Spaque ne relève pas d'avantages à l'utilisation de la géostatistique dans leur cas : « *L'approche ne convient pas du tout à des milieux non isotropes dûs à la géologie, à la présence d'infrastructures souterraines et/ou à la nature des sources de pollution, ou, si elle prend de tels éléments en compte, elle n'offre plus aucun avantage (coût bénéfice) par rapport à un modèle conceptuel élaboré sur base de la géologie et des résultats analytiques de manière « traditionnelle ».* » En alternative, elle propose donc un « *Modèle conceptuel du site traditionnel incorporant tous les éléments dans des coupes détaillées des taches de pollution.* » qui remporte un succès satisfaisant. Ce point de vue sera discuté lors de l'analyse critique de la situation actuelle, au chapitre 9.

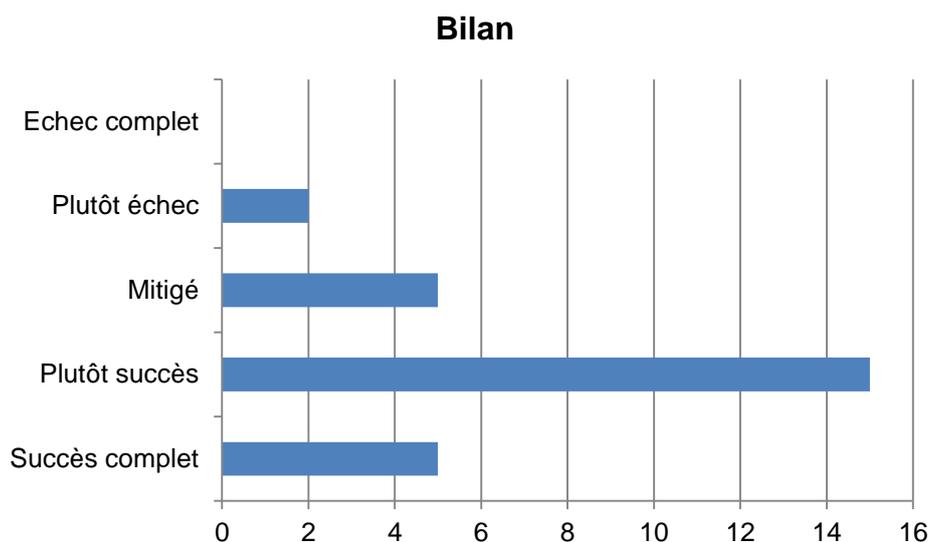


Figure 54 : Bilan global de l'utilisation de la géostatistique au cours de ces études.

En plus d'un bilan global sur l'utilisation de la géostatistique, les personnes ayant reçu le questionnaire ont été invitées à identifier les principaux freins à une utilisation plus courante de la géostatistique ainsi qu'à suggérer des améliorations pour rendre l'application de la géostatistique plus aisée.

Les réponses citées les plus fréquemment comme étant des freins à une utilisation plus fréquente de la géostatistique sont facilement identifiables sur la Figure 55. Les quatre réponses les plus fréquentes sont par ordre décroissant d'importance :

- un nombre de données insuffisant ;
- des sites ou des données dont les caractéristiques sont inadaptées à un traitement géostatistique ;
- des difficultés à faire comprendre la méthodologie géostatistique et ses intérêts aux différents interlocuteurs ;
- le surcoût engendré par l'emploi de la géostatistique.

Freins à l'utilisation

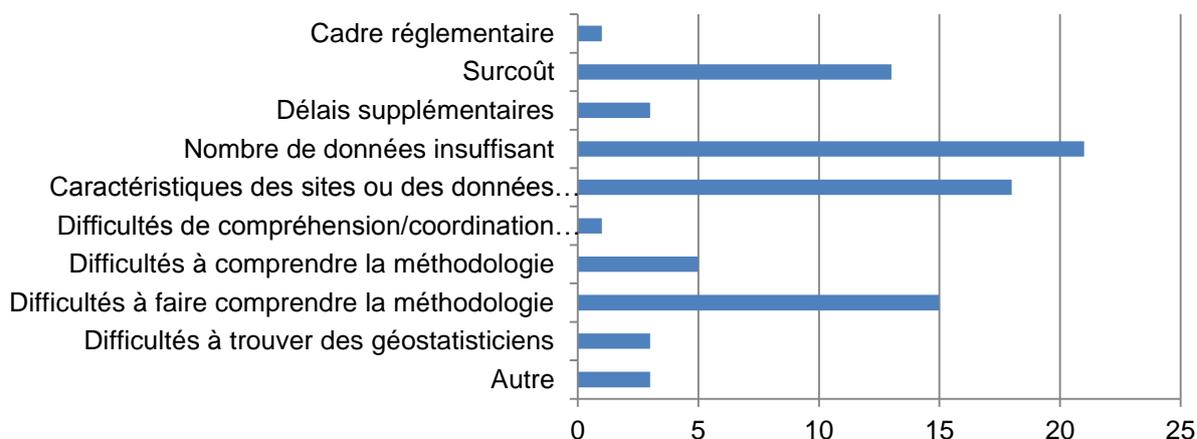


Figure 55 : Identification des freins à une utilisation plus courante de la géostatistique.

Afin de pallier ces différents freins mais aussi de pouvoir continuer à diffuser plus largement la géostatistique, plusieurs améliorations ont été proposées par les différents acteurs. Là encore, de nombreux éléments reviennent plusieurs fois et les différentes réponses peuvent être synthétisées autour de quatre thèmes :

- Communication : il est primordial de promouvoir l'utilisation de la géostatistique, par exemple grâce à des retours d'expérience ; une étape de vulgarisation est également importante afin que son emploi et ses intérêts soient plus facilement compris et intégrés.
- Outils : le développement d'outils plus conviviaux participerait à une utilisation plus large.
- Guides et réglementation : pour que son emploi soit favorisé, il est nécessaire que la géostatistique soit « prise en compte dans les guides méthodologiques et la normalisation spécifique aux sites et sols pollués » (B. Fricaudet de BFR EX POLL). Elle pourrait ainsi être intégrée de façon plus systématique.
- Couplages : pour S. Kaskassian du Burgeap, il est nécessaire de développer les couplages entre pollution de sol et lithologie (3D) et entre pollution du sol et des autres matrices (eau de nappe, air du sol). G. Gendreau de Socotec souligne la nécessité de « Prendre en compte les caractéristiques intrinsèques des sols en place (nombre de couches, épaisseur, porosité, perméabilité...) et des substances (viscosité, densité...) dans les transferts de la contamination et les modèles d'extrapolation des données. »

A. Paquet du MDDEP (Québec) propose le bilan suivant, certains points étant spécifiques au MDDEP, d'autres ayant été exprimés par plusieurs personnes :

« Nous sommes favorables à son utilisation dans le cours des études de caractérisation devant nous être déposées. En effet, les études de caractérisation qui nous sont déposées comportent trop d'incertitudes et il est courant que les travaux de réhabilitation subséquents souffrent alors d'un retard et d'une hausse inévitable des coûts.

Avant de promouvoir celle-ci dans le « marché » (du moins sur nos propres sites du passif gouvernemental), nous devons développer un argumentaire pour nos autorités i.e. d'abord justifier et démontrer les avantages et implications (ressources, formation, etc.). Le contexte budgétaire n'est cependant pas facilitant.

Si le MDDEP utilise cette approche géostatistique dans le cadre de la caractérisation et la réhabilitation [de] ses propres sites contaminés, nous croyons que cela enverra au marché (promoteurs et à leurs consultants) un signal clair sur notre volonté de changer les façons de faire actuelles. Nous devons tolérer les façons de faire utilisées depuis longtemps. Un tel changement de cap ne peut se faire qu'en douceur, par la persuasion, et non la coercition... d'autant plus que l'expertise n'est pas au MDDEP.

Des activités de formations [à la géostatistique] au Québec sont importantes mais le coût de ces dernières est bien souvent prohibitif d'autant plus que les différentes organisations publiques

retiennent souvent une plateforme plus globale (par exemple, au MDDEP, il serait difficile de justifier un outil géostats qui ne serait pas sur ArcGIS). Ça n'aide toutefois pas la concurrence à percer, on le convient. C'est donc via des projets réalisés sous contrat que nous serons à même d'examiner le potentiel de ces outils. Mais avant de choisir un tel outil, quel qu'il soit, une certaine « évangelisation » est incontournable. L'outil en tant que tel devient alors secondaire (facilité d'usage, etc.) et doit s'effacer momentanément.

Parce que nous sommes très favorables au recours à de tels outils, nous tentons par des façons détournées de nous débrouiller. Ainsi, nous essayons de confier une partie de notre « familiarisation » en interne à des étudiants /stagiaires familiers avec ces outils (notamment des étudiants du domaine du génie minier). Toutefois, leurs outils géostatistiques sont différents (ex : logiciel minier Surpac) et quand vient le temps de les accueillir au sein du MDDEP, la question du logiciel et d'une licence temporaire (15 semaines) devient vite un frein. Money talks ! »

Une dernière question de l'enquête concernait les prévisions d'utilisation de la géostatistique dans les 5 prochaines années. Chacun pense continuer à mettre en pratique la méthodologie et pour certains elle devra être développée et systématisée. A. Paquet (MDDEP) ajoute « Si nous réussissons à convaincre nos autorités et les promoteurs, un recours plus généralisé, voire favorisé mais nous ne pourrions l'imposer... cela fera partie du coffre à outil de la caractérisation. »

Enfin, S. Belbèze (Antea Group) propose un bilan sur le surcoût engendré par une étude géostatistique réalisée en interne. Le surcoût serait « a priori de 10 k€ en moyenne », ce qui entraîne les conclusions suivantes :

- Pour les 80% des diagnostics dont le coût est inférieur à 10 k€, un rapport de 1 et une « utilisation de la géostatistique inenvisageable »
- Pour les 20% restant dont le coût est supérieur à 100 k€, un rapport de 1/10.

« L'analyse géostatistique est appliquée sur de gros sites (2 à 3/an) en préalable à des dépollutions qui dépassent le million d'euros. Dans ce cas, le bénéfice est une meilleure planification de l'opération, économie des analyses de camions et des personnels de terrain qui sont moins sollicités. Le projet reste plus dans le budget. »

7.2.4. Prise en compte des incertitudes sur les mesures

Indépendamment de la mise en œuvre de la géostatistique, une question portant sur la gestion des incertitudes attachées aux mesures était proposée. Il semble que leur traitement dépende beaucoup du contexte comme le souligne B. Beuthe de la Spaque : « Leur traitement dépend du contexte du site et des implications sur la décision d'assainir ou non. » Le cas le plus fréquent est de faire réaliser des duplicats en laboratoire, permettant d'appréhender ces incertitudes métrologiques ; G. Plassart de Neodyme Envisol fait par ailleurs remarquer que « L'essentiel ne se situe pas au niveau de l'analyse mais lors de la constitution des échantillons, c'est là-dessus que nous essayons de travailler. » D'autres acteurs mentionnent cependant que l'incertitude analytique reste largement significative et ne doit surtout pas être mésestimée.

Incertitudes associées aux mesures

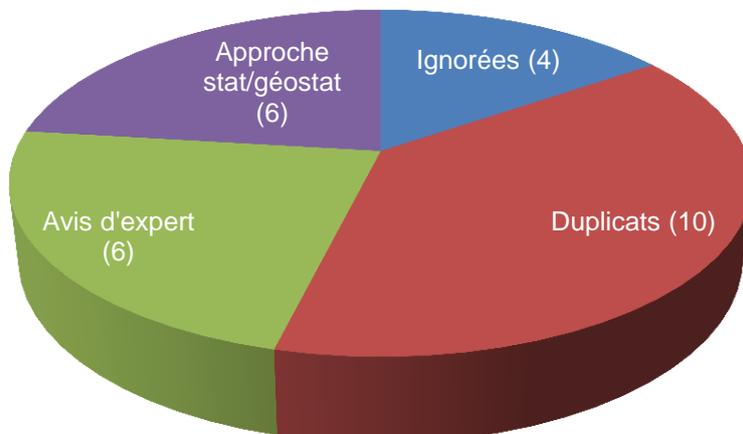


Figure 56 : Traitement des incertitudes associées aux résultats analytiques.

7.2.5.Synthèse des « fiches sites » : objectifs des études et bilans

En complément de l'enquête sur l'utilisation globale de la géostatistique, des « fiches sites » pouvaient être remplies par les différents acteurs afin d'illustrer l'utilisation de la géostatistique par des cas concrets. Au total, 17 personnes ont fourni 24 « fiches sites » dont les principaux résultats sont décrits ici, certaines faisant l'objet de fiches de cas plus détaillées présentées au chapitre 8.

Les descriptions des sites montrent que les polluants les plus couramment traités (Figure 57) sont les hydrocarbures (BTEX et HAP inclus) suivis des contaminations radiologiques puis des métaux. Les milieux touchés sont soit les sols soit les eaux (le plus souvent souterraines) pour la très grande majorité des cas ; un cas de contamination de l'atmosphère par des biogaz est reporté ainsi que plusieurs cas de contaminations radiologiques de bétons. Concernant les activités passées ou présentes des sites, elles sont essentiellement industrielles ; quelques cas d'activités de recherche ou de sites agricoles ont aussi été traités. Les tailles des sites vont de 3000 m² à 600 ha pour les contaminations chimiques et de 200 m² dans un bâtiment à plusieurs dizaines de km² (région) pour le nucléaire. Enfin, les enjeux sont importants, sanitaires ou financiers (estimation des volumes, coûts de réhabilitation) essentiellement et souvent liés à la vente ou au changement d'usage du site.

On note donc une variété importante des cas traités, tant du point de vue du type de pollutions que des sites caractérisés (activité, taille), ce qui est cohérent avec ce qui a été rencontré dans la revue bibliographique.

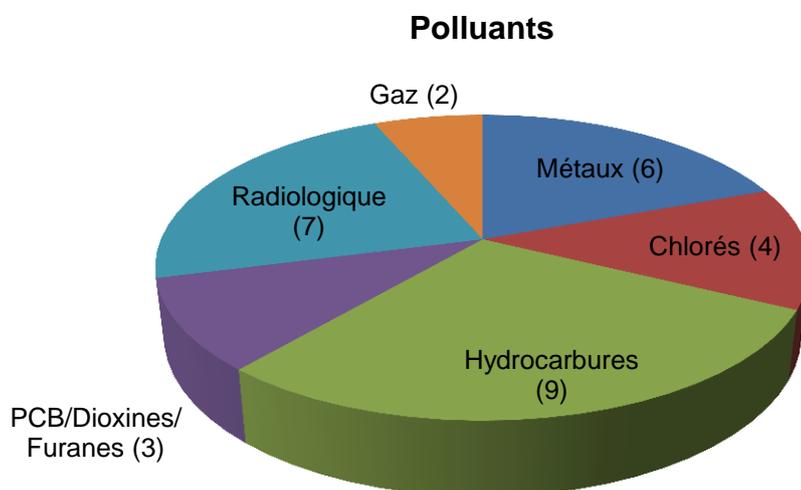


Figure 57 : Polluants rencontrés sur les différents sites présentés par les participants à l'enquête.

Tous les objectifs d'utilisation de la géostatistique ont au moins été cités une fois (Figure 58). Les plus fréquents sont la cartographie d'une pollution en place ainsi que le calcul de volumes ou de masses de polluants associés. Vient ensuite l'évaluation de la compatibilité des terres avec les usages futurs envisagés pour le site (analyse de risque), parfois accompagnée d'une orientation des terres vers les différentes filières de traitement/valorisation/mise en décharge. Sur ce dernier point et pour la quantification des masses de polluants S. Belbéze (Antea Group) souligne la difficulté à « maîtriser le futur support d'excavation », dont la prise en compte est pourtant indispensable lors de ces étapes.

En amont de la caractérisation ou pour des campagnes itératives, l'optimisation de stratégies d'échantillonnage est citée dans 9 fiches sur 24.

Pour toutes les fiches, les objectifs sont considérés comme ayant été atteints, même si des réserves sont émises. Celles-ci concernent le plus souvent les fortes incertitudes associées aux résultats des études et provenant en général de problèmes sur les données ou les caractéristiques de sites (voir Figure 59).

Objectifs de la géostatistique

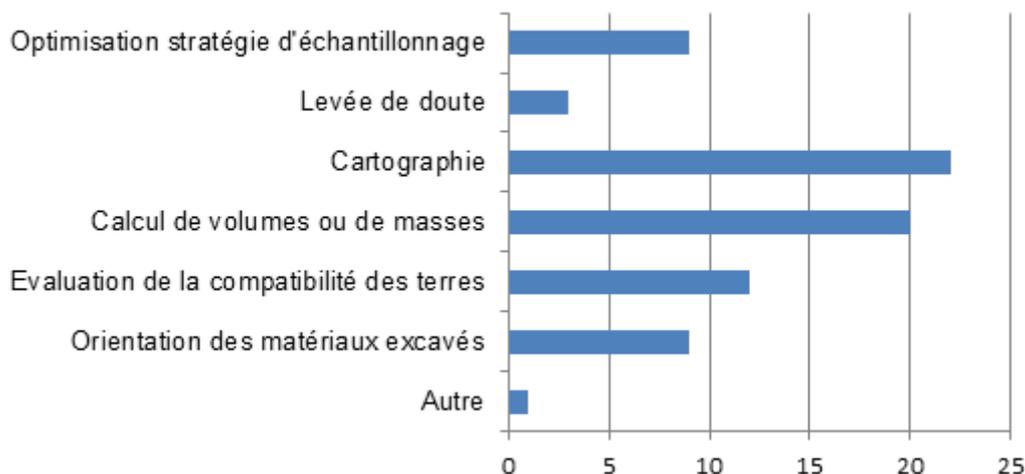


Figure 58 : Objectifs de l'utilisation de la géostatistique sur les différents sites.

La question portant sur l'intégration d'informations secondaires montre qu'elle n'est pas du tout systématique, même lorsque ces dernières sont disponibles. Pour 9 fiches, des mesures sur site sont disponibles et pour 3 fiches, il s'agit de mesures géophysiques ; cependant, seuls 5 couplages géostatistiques de ces données sont réalisés : utilisation d'une ancienne topographie disponible, corrélation entre mesures PID et laboratoires puis prise en compte dans la modélisation ou encore prise en compte d'une corrélation avec la profondeur et des faciès géologiques. S. Belbeze d'Antea Group note aussi que « *Parfois il est possible de kriger simplement le PID ou la variable puis d'appliquer une loi d'espérance conditionnelle empirique à la mesure pour obtenir une teneur en polluant.* » La pertinence d'une telle approche repose alors sur la confiance accordée à la relation empirique entre mesures PID et teneurs en polluant, qui peut nécessiter l'acquisition d'un nombre conséquent de données (plusieurs dizaines, voire une centaine).

Une dernière partie des fiches propose une analyse critique de l'utilisation de la géostatistique sur ces sites avec une question portant sur les plus-values apportées par cette méthodologie puis une question portant sur les problèmes rencontrés.

Les plus-values peuvent être synthétisées de la manière suivante :

- Apport d'une lisibilité accrue et possibilités de visualisations intéressantes,
- Estimation des extensions et volumes de polluants assorties d'incertitudes quantifiées et pouvant être maîtrisées,
- Confortation d'approches déterministes mais aussi découvertes de nouvelles sources de pollution pour P. Pouget-Abadie d'URS France « *Confirmer du point de vue technique les évaluations déterministes mises en œuvre – rassurer les décideurs sur le fait que les travaux avaient été dimensionnés de manière adéquate et que les provisions avait été estimées sur une base solide.* »,
- Possibilité d'optimiser des échantillonnages en fonction des incertitudes et des probabilités de dépassement de seuils.

Comme le montre la Figure 59, les problèmes rencontrés sont presque toujours liés aux données ou au site (taille, échantillonnage...). Les précisions apportées font état de problèmes liés :

- À la quantité de données : très souvent trop faible, parfois très importante (gestion d'une grande quantité de données radiologiques),
- À un échantillonnage non adapté : nombre, support des mesures, limites de détection différentes, échantillonnage régulier à maille trop grande non resserrée par endroits,
- À une intégration tardive de toutes les informations disponibles telles qu'un historique précis (exemple de l'intégration d'une ancienne topographie lors de la caractérisation d'une contamination radiologique profonde, reprise par la suite dans les fiches de cas),
- À des contaminations montrant peu de continuité spatiale, par exemple dans des remblais.

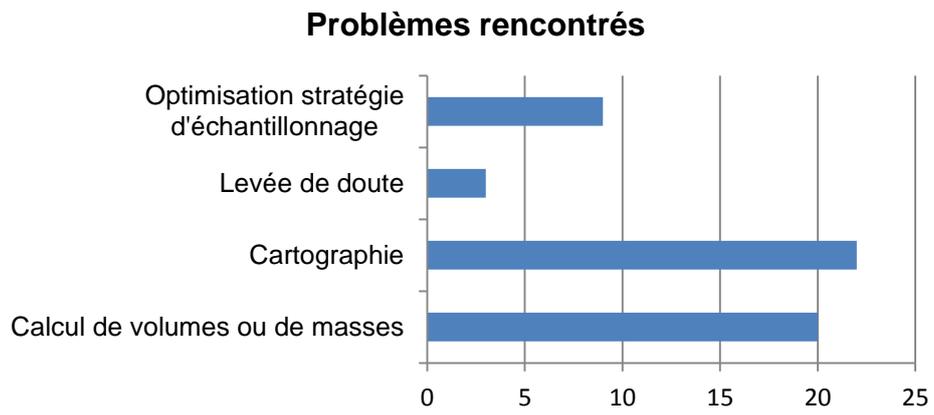


Figure 59 : Problèmes rencontrés lors de l'utilisation de la géostatistique sur ces sites.

8. Les fiches de cas

8.1. Principe

Les quatre fiches de cas présentées dans ce chapitre correspondent à des sites mentionnés par certains professionnels ayant répondu à l'enquête. Ces sites ont fait l'objet d'une étude géostatistique pour répondre à différents objectifs. Selon les cas, ces objectifs ont été totalement ou seulement partiellement atteints.

Chaque fiche de cas comprend les paragraphes suivants :

- Contexte (site, pollution, auteur de l'étude),
- Objectifs de l'étude,
- Approche mise en œuvre,
- Synthèse des résultats obtenus et analyse critique.

Au-delà de ces fiches de cas, mentionnons que des études de démonstration ont été réalisées dans le cadre de l'association Geosipol (Geosipol, 2012). En particulier, un site TOTAL a pu faire l'objet d'une validation après dépollution du modèle géostatistique ; ce site a été discuté au paragraphe 6.5 (Fauchaux et Jeannée, 2012).

En outre, l'étude bibliographique a permis d'identifier plusieurs cas d'étude intéressants.

- (Guastaldi & Del Frate, 2012) : site italien, utilisation de simulations pour mener une analyse de risques résiduels ; l'utilisation de la géostatistique comme outil d'aide à la décision est montrée, avec **des conclusions qui sont très proches de la présente étude**.
- (Verstraete & Van Meirvenne, 2008) : site belge ayant été échantillonné de manière systématique avant dépollution (1200 données), recherche a posteriori d'un nombre plus faible d'échantillons à collecter tout en préservant la qualité de la prévision (300 données auraient suffi selon les auteurs) (aspect **rationalisation de l'échantillonnage**).
- (Bengtsson & Torneman, 2009) : site suédois avec pollution aux HAP, où le **carbone organique total** du sol est apparu comme une information secondaire importante dans la modélisation des risques associés au site ; **l'influence du support** est également correctement discutée et prise en compte dans la modélisation (différence entre mailles pour évaluer les risques et blocs de dépollution).
- (Mouser et al., 2005) : estimation d'une pollution complexe en nappe d'une décharge par krigeage des composants issus d'une ACP de plusieurs paramètres hydrochimiques et bactériologiques.

8.2. Site de Dourges

Fiche réalisée sur la base des informations transmises par Pierre Delcourt (CETE Nord-Picardie), qui a réalisé l'étude géostatistique en 2011.

8.2.1. Contexte

Le site est celui de l'ancienne usine Agglonord, sur lequel plusieurs activités ont cohabité ou se sont succédées : briqueterie, usine de boulets, production d'anthracine, extraction minière...

Au moment du diagnostic, la parcelle est suivie en tant qu'ancienne installation minière par l'Unité Territoriale Après-Mine Nord-Pas-de-Calais en raison d'une problématique de pollutions des eaux souterraines par des hydrocarbures. Le CETE (Centre d'Études Techniques de l'Équipement) Nord-Picardie a en charge une étude de diagnostic du site afin de vérifier sa compatibilité avec un usage défini.

De nombreux diagnostics avaient été réalisés précédemment sur cette parcelle. Étant données les informations collectées le site est impacté par une pollution des eaux souterraines principalement par les hydrocarbures aromatiques polycycliques. De plus, compte tenu des activités y ayant eu lieu, des pollutions par hydrocarbures seront potentiellement mises en évidence dans les principaux lieux de l'activité et à proximité des lieux de stockage.

En considérant l'ensemble des informations récoltées dans l'étude historique, il est apparu nécessaire d'investiguer les milieux sols, eaux souterraines et air.

8.2.2. Objectifs de l'étude

L'éventuelle contamination du site ainsi que les potentiels transferts de pollution vers les eaux ont été évalués à partir d'investigations des sols et des nappes souterraines. Différents types de mesures et milieux ont fait l'objet d'analyses :

- Étant donnée l'utilisation potentielle de substances volatiles (hydrocarbures volatils, composés organiques volatils...) lors de l'activité du site, celles-ci ont été recherchées dans les gaz du sol et les sols jusqu'à la nappe superficielle.
- En surface, des analyses de métaux ont été réalisées ainsi que des mesures de lixiviation afin d'apprécier leur comportement et leur capacité à impacter les eaux souterraines.
- Les hydrocarbures ont été mesurés dans les deux premiers mètres de sols sur l'ensemble du site, des investigations plus profondes (6m) ont été faites dans les zones les plus suspectées d'être polluées (à proximité des cuves et zone d'exploitation...).
- Après la première phase de l'étude il s'est avéré que la contamination des sols était essentiellement due aux hydrocarbures (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques et Hydrocarbures totaux).

L'étude géostatistique présentée ici se concentre donc sur la pollution par les hydrocarbures. Elle a pour objectifs d'apprécier les niveaux en HAP grâce à une cartographie et de quantifier les surfaces contaminées sur le site afin de prévoir la dépollution du site et d'estimer les coûts de remédiation permettant d'assurer une compatibilité entre pollution et futur usage des sols.

L'étude géostatistique des teneurs en HAP dans les sols comprend une cartographie à deux dimensions pour chacune des deux couches de sol considérées ainsi qu'une estimation des surfaces impactées pour trois seuils de pollution considérés : 50, 200 et 500 mg/kg.

8.2.3. Approche mise en œuvre

Les niveaux de contamination sont très variables et ont été appréciés à partir d'un plan d'échantillonnage contenant 27 sondages pour lesquels deux échantillons ont été prélevés dans les deux premiers mètres.

La contamination est généralement faible à moyenne, quelques points localisés présentant des valeurs très élevées. Celles-ci peuvent être liées à leur positionnement sur le site en fonction des activités antérieures (proximité de l'usine à boulets) ou de l'utilisation de remblais contaminés (ancien canal, remblais de schistes houillers). Dans les remblais, les teneurs en hydrocarbures (aromatiques et totaux) sont très hétérogènes.



Figure 60 : Sondages réalisés sur le site de Dourges.

En plus des hydrocarbures, les analyses ont montré :

- Des teneurs en métaux assez élevées mais cohérentes avec les remblais de schistes houillers, un point présentant une très forte anomalie qui peut être expliquée par un rejet de déchets (piles). Par ailleurs les métaux n'apparaissent pas lixiviables et ne migrent donc pas dans les sols.
- Une contamination ponctuelle par des PCB, sans doute liée à la présence d'un ancien transformateur.

Ces contaminations ne sont pas abordées dans la partie géostatistique. Enfin, aucune pollution n'a été mise en évidence à une profondeur supérieure à 2 m.

Les cartographies des deux couches de sol (exemple de la couche 0-1 m ci-dessous) montrent des incertitudes associées aux estimations importantes ; elles sont dues à l'hétérogénéité de la contamination et à l'espacement des sondages d'environ 90 m.

En surface, les contaminations se situent principalement dans les anciennes zones d'activités (proximité de l'usine d'anthracine, des quais de chargement/déchargement, stockages...).

En profondeur, la pollution est présente dans les remblais des anciennes zones d'activités (pollutions moyennes). Les matériaux utilisés en remblais pour les voies ferrées sont légèrement pollués par les HAP, ceux utilisés pour le comblement du canal (provenant certainement des déchets de l'activité de l'usine et des schistes houillers) sont fortement contaminés par des HAP et des hydrocarbures totaux.

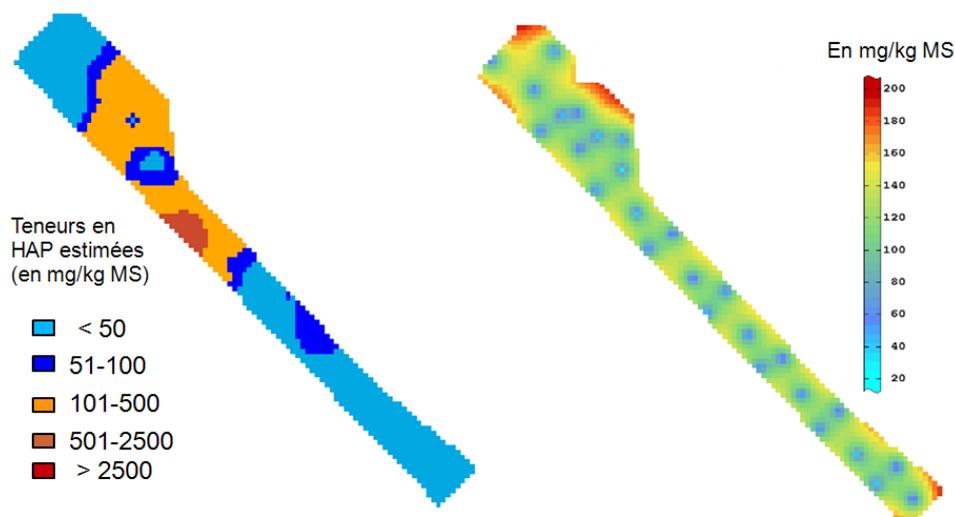


Figure 61 : Estimation de la teneur en HAP dans les sols superficiels (0-1 m) et incertitudes associées.

Outre ces cartographies, des cartes de probabilité de dépassement de seuils ont également été réalisées pour chaque couche et chaque seuil considéré. Puis les surfaces contaminées ont été évaluées après avoir réalisé 200 simulations.

Les résultats pour le seuil de 50 mg/kg MS (limite d'acceptation en Installation de Stockage de Déchets Inertes (ISDI)) sont présentés ci-dessous pour la première couche de sol. À titre d'exemple on constate une surface contaminée probable de 51 400 m² pour cette couche avec un intervalle de confiance à 90 % compris entre 43 100 et 59 800 m². Sur la cartographie de probabilité de dépassement certaines zones apparaissent clairement définies comme étant polluées ou non polluées ; cependant une zone assez grande située dans la partie nord du site a une probabilité intermédiaire d'être contaminée : les incertitudes quant au dépassement du seuil dans cette zone sont grandes.

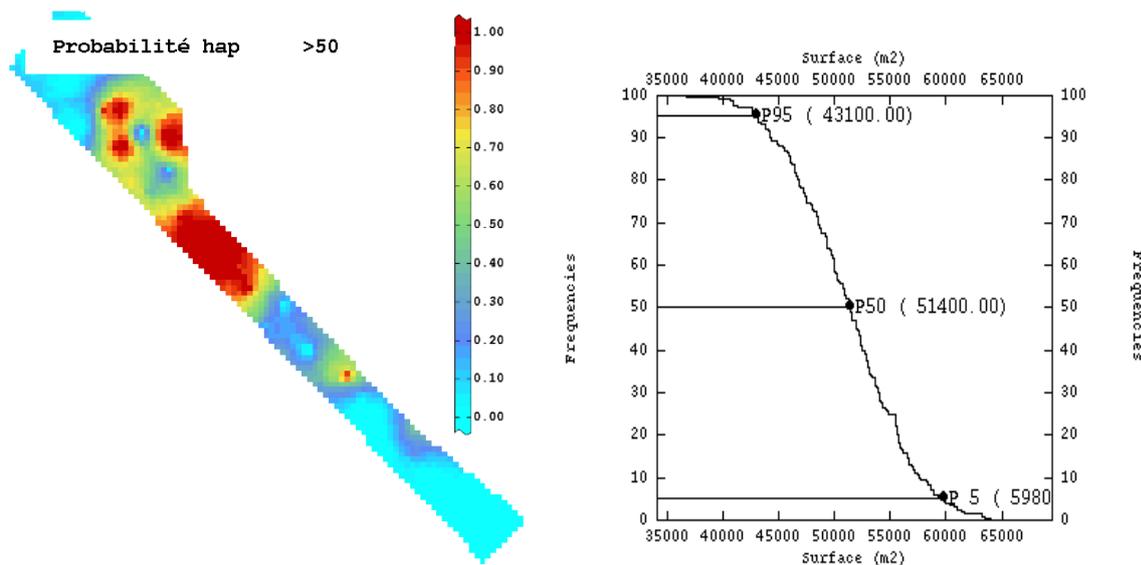


Figure 62 : Contamination en HAP des terres superficielles (0-1 m) en considérant le seuil de 50 mg/kg. À gauche : Carte de probabilité de dépassement. À droite : Surfaces probables contaminées.

8.2.4. Analyse critique

Cette étude présente une application classique de la géostatistique en présence d'un nombre de données limité.

Les points marquants relevés lors de cette étude sont :

- L'importance d'une étude historique poussée afin d'expliquer les différentes sources de contamination à la fois en termes de contaminant et de localisation attendue
- La difficulté à gérer les incertitudes en raison de remblais très hétérogènes et de sondages espacés d'environ 90 m. La forme du site, très en longueur ne facilite pas non plus l'étude variographique.

8.3. Site de Sarcelles

Fiche réalisée sur la base des informations transmises par Stéphane Belbèze (Antea Group), l'étude géostatistique ayant été menée en interne par Antea vers 2008.

8.3.1. Contexte

Le site de Sarcelles est d'une surface de 6200 m² et est situé dans un quartier pavillonnaire (Figure 63). Jusqu'en 1967, il a abrité des activités de production de gaz, puis a été utilisé comme atelier municipal par la Ville de Sarcelles. En 2006, une SCI (Société Civile Immobilière) envisage sa réutilisation pour un projet d'aménagement comprenant un immeuble de logements avec un niveau de sous-sol, un jardin central semi-collectif ainsi que des pavillons individuels avec jardins privés.



Figure 63 : Localisation du site (extrait Géoportail).

8.3.1. Objectifs de l'étude

Antea a participé à la réalisation du plan de gestion permettant de définir différentes options de remise en état du site compte tenu des nombreuses problématiques l'entourant : aménagement prévu pour le site, analyse des risques résiduels pour les futurs usagers, maîtrise des impacts sur le voisinage (eaux souterraines notamment), gestion et optimisation des terres excavées devant être éliminées en CET, définition d'une méthodologie de réhabilitation/tri des terres compatibles avec les impératifs économiques et enfin gestion des rapports entre ancien exploitant et administration.

L'analyse géostatistique réalisée par Antea s'inscrit dans le contexte de la gestion des terres excavées afin d'en optimiser la prévision. Une cartographie précise des teneurs en polluants du site a été réalisée ainsi qu'une estimation des volumes de sols contaminés, utilisant les simulations conditionnelles (méthode des bandes tournantes).

8.3.2. Approche mise en œuvre

Les 61 sondages disponibles sont représentés sur la Figure 64, constituant un total de 221 échantillons. Trois indicateurs de pollution sont considérés : somme des HAP, concentrations en naphthalène et en benzo(a)pyrène ; différents seuils sont associés à chacun d'entre eux (Tableau 10) et l'estimation finale des volumes (tonnages) résulte du croisement de ces trois paramètres.

Une analyse exploratoire puis une analyse variographique ont été réalisées. Étant donnée la distribution asymétrique des données avec une forte prédominance des valeurs faibles et très peu de valeurs fortes, chacune des trois variables subit une transformation logarithmique avant l'anamorphose gaussienne qui permet la réalisation des simulations. Les simulations sont ensuite réalisées ponctuellement par bandes tournantes sur une grille en 3 dimensions de maille 1 m.

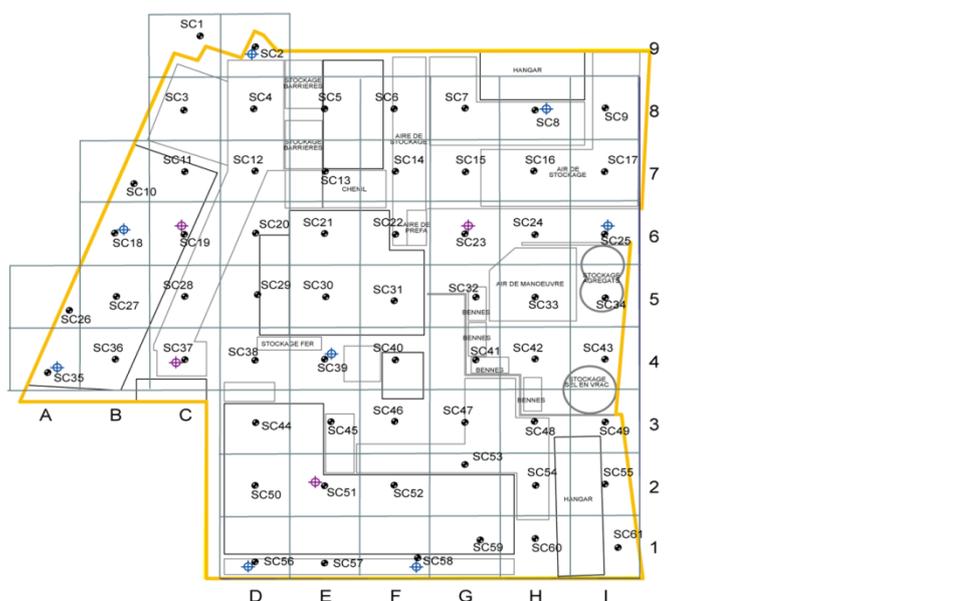


Figure 64 : Plan du site, implantation des sondages et maillage d'excavation retenu.

Tableau 10 : Seuils de contamination considérés pour les trois polluants et seuils d'admissions en CET.

	BAP	NAPH	HAP
Seuil de contamination	3,5 mg/kg (VDSS)	23 mg/kg (VDSS)	50 mg/kg
CET de classe 2	entre 1 et 5 mg/kg		entre 50 et 100 mg/kg
CET de classe 1	sup. à 5 mg/kg	sup. à 20 mg/kg	entre 100 et 500 mg/kg
Incinérateur			sup. à 500 mg/kg

8.3.1. Synthèse des résultats obtenus

Les simulations géostatistiques obtenues sont ensuite post-traitées de manière à calculer le volume contaminé total, dès que l'un des polluants dépasse le seuil de contamination (Figure 65), assorti d'une quantification de l'incertitude autour du volume probable.

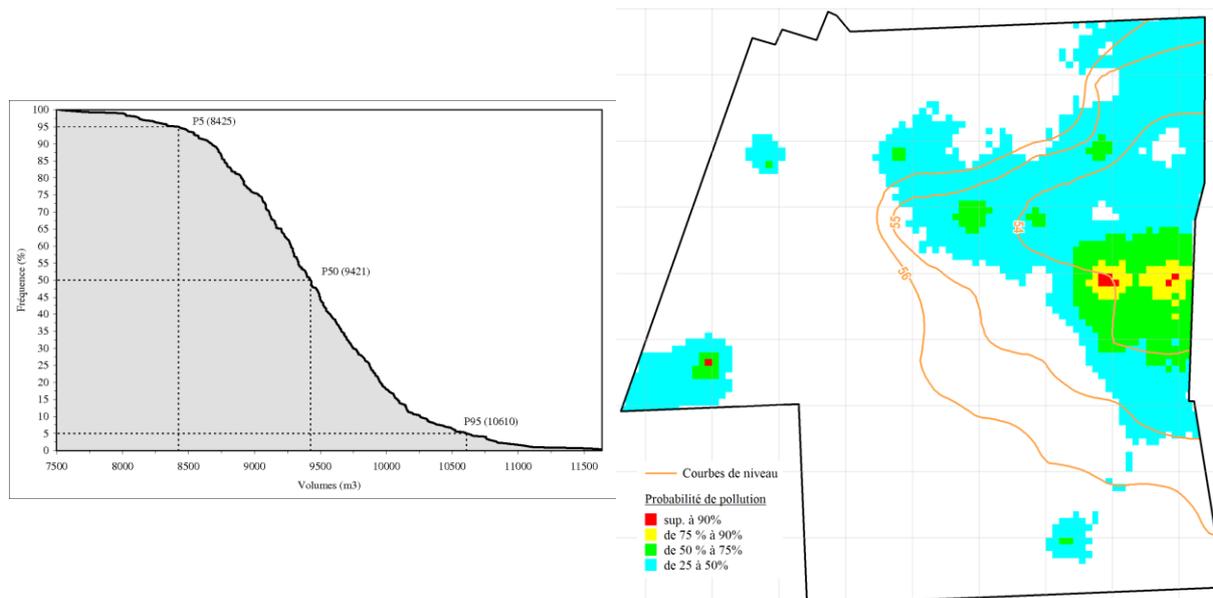


Figure 65 : Gauche : Histogramme cumulé inverse des volumes contaminés en HAP, naphtalène ou benzo(a)pyrène (indication des quantiles 5, 50 et 95%), droite : cartographie de la probabilité de contamination pour la couche 53-54 m.

En plus du tonnage total, sont également calculés les tonnages pour chacune des couches d'1 m allant de 51 à 56 m et les tonnages répartis par classe en fonction de leur destination après excavation. Le Tableau 11 montre les tonnages obtenus par estimation géostatistique et pour chacune des classes de pollution. Si le tonnage global est bien estimé, il existe une grande différence dans la répartition entre les deux classes de CET (inversion) et le volume incinéré est double de celui prédit.

Tableau 11 : Tonnages de terres contaminées répartis en fonction de leur destination : comparaison entre estimation géostatistique et quantités éliminées après le chantier.

	CET 2	CET 1	Incinérateur	Total
Modèle géostatistique	2 105 t	7 973 t	1 228 t	11 305 t
Éliminé après le chantier	5 686 t	1 418 t	2 414 t	9 518 t

8.3.2. Analyse critique

Les volumes obtenus par Antea sont bons de manière globale mais la répartition entre les différentes destinations de traitement ne l'est pas. Une des principales raisons de ces différences peut résider dans la différence entre le support de modélisation utilisé pour les simulations, de 1 m de côté horizontalement et **le support d'excavation, qui correspondrait approximativement à une maille de 10 m.**

Afin d'observer les changements issus de la prise en compte du bon support d'excavation les simulations ont été refaites sur une grille de maille 10 m et les mêmes post-traitements effectués.

Tableau 12 : Tonnages de terres contaminées répartis en fonction de leur destination : comparaison entre estimation géostatistique à maille 1m (Antea) et à maille 10 m.

$t_{total} = 34420 \text{ t}$	CET2	CET1	Incinérateur	Total
1 m Antea	2 105	7 973	1 228	11 305
10 m	1 548	1 607	120	3 314

De façon à observer l'impact direct de la prise en compte de la maille d'excavation, l'histogramme de la Figure 66 superpose les résultats d'une simulation pour la maille 1 m et la maille 10 m (tous les autres paramètres étant inchangés) et ce pour la variable HAP qui est la plus contraignante en termes de seuils. Les volumes correspondant à chacune des situations sont reproduits dans le Tableau 13.

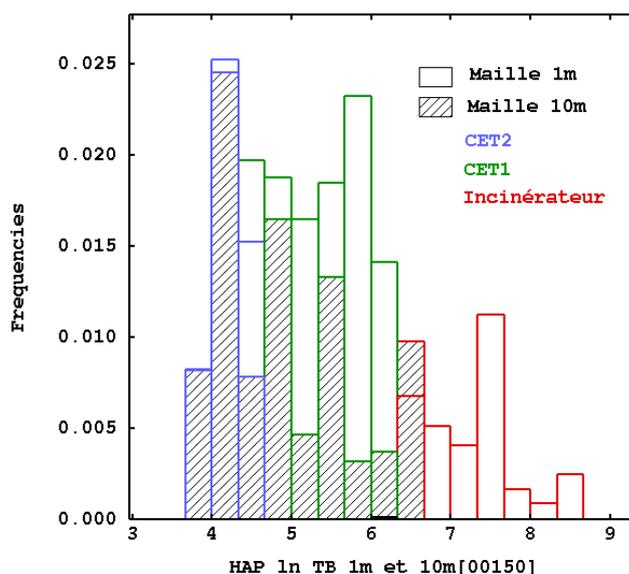


Figure 66 : Superposition des résultats d'une simulation en HAP (logarithme) à maille horizontale 1 m (blanc) et 10 m (hachures). Seules les valeurs au-delà du seuil de contamination sont représentées : en bleu, envoi en CET2, en vert, envoi en CET1 et en rouge, incinération.

L'effet de régularisation dû à l'augmentation de la taille du support est très facilement visible. Ainsi les valeurs très fortes sont beaucoup moins nombreuses pour la simulation à maille 10 m en raison d'une prise de moyenne qui tend à faire diminuer la valeur de la maille. Sur l'histogramme seules les valeurs au-dessus du seuil de contamination sont représentées, elles sont environ deux fois plus nombreuses avec la maille 1 m qu'avec la maille 10 m, pour laquelle plus de mailles se retrouvent en dessous du seuil de contamination après la prise de moyenne.

Tableau 13 : Comparaison des tonnages par classe pour une simulation à maille 1 m et la simulation correspondante à maille 10 m (en tonnes).

Simu n° 150	CET2	CET1	Incinérateur	Total
1 m	1675	3168	1229	6072
10 m	1396	1420	341	3156

Contrairement par exemple au cas du site TOTAL présenté au paragraphe 6.5, dans le cas présent la prise en compte du bon support d'estimation n'a pas permis d'expliquer les différences de tonnages entre prévision et excavation.

Il est par conséquent vraisemblable que les écarts observés soient liés au protocole d'excavation adaptatif utilisé par Antea Group sur ses chantiers. En effet, l'ingénieur ajuste en temps réel sur le terrain sa maille d'excavation (front de taille et profondeur) en fonction de ses mesures in situ (géologie, odeur, couleur, et mesure PID) :

- La maille carrée 10 x 10 x 1 du modèle géostatistique n'est localement pas respectée ;
- Les fortes pollutions ne sont alors plus moyennées avec des sols environnants ce qui explique le doublement des volumes incinérés au détriment de la mise en CET de classe 1 ;
- Les teneurs de réconciliation sont issues des résultats de l'échantillonnage des bennes de camions par le CET.

L'étude géostatistique du site de Sarcelles aura permis un tri fin des matériaux sur site et aura, par sa réconciliation, mis l'accent sur la nécessaire prise en compte des futures conditions de dépollutions et critères de tri pour son processus de modélisation géostatistiques. Antea Group travaille depuis à la simulation de chantiers à plan de mailles variables et tenant compte de géologies hétérogènes.

8.4. Site de la Pila

Fiche réalisée sur la base d'une étude géostatistique menée par les bureaux Kidova puis eOde, à la demande du bureau CSD. Avec l'autorisation du Service de l'Environnement de Fribourg.

8.4.1. Contexte

Le site de la Pila a été utilisé comme décharge d'ordures ménagères par la ville de Fribourg, en Suisse, entre 1952 et 1975. La décharge occupe une surface d'environ 2 ha dans un méandre de la Sarine (Figure 67). Des investigations conformes à la réglementation suisse sur les sites pollués (ordonnance sur les sites contaminés du 26.08.1998) ont été initiées en 2004 et ont révélé une importante contamination aux PCB de type dioxine liée à l'enfouissement de condensateurs dans la décharge. Des teneurs trop élevées en PCB dans la chair des poissons ont conduit en 2007 à l'interdiction de pêcher sur une portion de la rivière. La nécessité de dépollution (assainissement) a été confirmée par le Service de l'Environnement du Canton de Fribourg en 2009 et 2010. Les études préalables à la dépollution sont actuellement en cours. Une synthèse des études menées jusqu'en juin 2011 est disponible sur le site internet dédié à la décharge : http://www.fr.ch/pila/files/pdf33/20110629_CSD_rapport_synthese_investigations.pdf.



Figure 67 : Photographie aérienne du site (© Michel Roggo. Vue aérienne de la Pila, 29 septembre 2007).

8.4.2. Objectifs de l'étude

L'étude géostatistique a été réalisée au terme de l'investigation de détail destinée notamment à apprécier l'ampleur de la source de contamination dans la décharge. Il s'agissait de préciser les estimations de volumes (tonnages) de déchets contaminés par filière d'élimination, compte-tenu de leurs teneurs en PCB, et de cartographier les matériaux ainsi classés. Ces estimations géostatistiques ont été répétées pour différentes options de tri des matériaux envisagés avant excavation. Des estimations séparées de deux secteurs de la décharge ont également été demandées. Ces estimations ont été produites à la demande, au fur et à mesure de la progression de la réflexion du bureau CSD sur les diverses options de dépollution.

8.4.3. Approche mise en œuvre

Les données disponibles étaient constituées de 267 échantillons de déchets prélevés dans 51 sondages et fosses, analysés au laboratoire pour une quantification des PCB (Figure 68). Les déchets devaient être classés selon 6 filières en fonction de leur teneur en PCB, tel que décrit dans le Tableau 14. Le coût d'élimination des matériaux est d'autant plus élevé que les teneurs en PCB sont fortes ; celui des catégories 5 et 6 des plus fortes teneurs en PCB est particulièrement important.

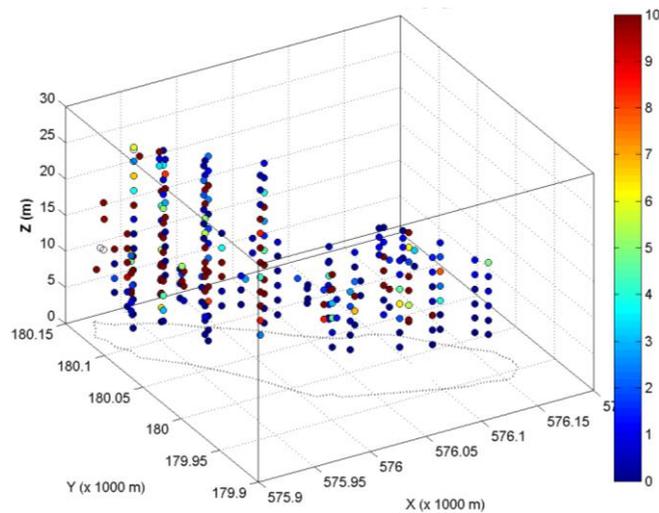


Figure 68 : Position des points de données disponibles dans la décharge de la Pila (concentrations en PCB en mg/kg ms).

Tableau 14 : Filière d'élimination des matériaux selon leur charge en PCB.

Catégorie	PCB (mg/kg ms)	Filières probables
1	$x < 0.1$	Propre ou DCMI ¹¹
2	$0.1 \leq x < 1$	DCMI ou DCB ¹²
3	$1 \leq x < 10$	DCB ou traitement
4	$10 \leq x < 50$	Cimenterie ou incinération
5	$50 \leq x < 1000$	Incinération
6	$x \geq 1000$	Incinération

De manière classique, les données ont fait l'objet d'une analyse exploratoire qui a révélé la nécessité de transformer les données en une distribution gaussienne (par la méthode des scores normaux) pour s'inscrire dans le cadre théorique de la modélisation. L'analyse variographique a mis en valeur une très forte hétérogénéité de la pollution dans le plan horizontal, mais une certaine continuité spatiale dans la direction verticale, avec zone d'influence de la pollution (portée) de l'ordre de 6 m.

Un ensemble de 500 simulations des teneurs en PCB sur une grille fine de mailles 2 m x 2 m x 2 m (8 m³) a été généré, puis utilisé pour une estimation des volumes (tonnages) de matériaux par filière, chacune assortie d'un intervalle de confiance à 95 %. Les secteurs les plus pollués ont ensuite été localisés à partir d'une cartographie des probabilités de dépassement en PCB de la teneur de 10 mg/kg ms calculées à partir des simulations.

Le même ensemble de simulations a été utilisé pour ré-estimer les volumes et tonnages pour différentes tailles de blocs (mailles) par lesquels il est prévu d'excaver les matériaux : des simulations des teneurs moyennes en PCB dans des mailles de 6 m x 4 m x 2 m (48 m³), puis de 8 m x 6 m x 2 m (96 m³) ont été constituées, puis les calculs de volumes et tonnages par filière ont été répétés. De la même façon, les simulations de départ (sur grille fine) ont été réutilisées pour calculer de manière séparée les volumes de matériaux par filière dans la zone haute (ouest) et la zone basse (est) de la décharge.

8.4.4. Synthèse des résultats obtenus

- Volumes calculés sur la grille fine (Tableau 15)

Les plus grands volumes de matériaux calculés sur la grille fine appartiennent à la catégorie 3 des teneurs intermédiaires en PCB. Les volumes les plus faibles concernent les catégories 5 et 6 des plus fortes teneurs en PCB, qui sont aussi les volumes affectés de la plus grande incertitude. Or bien que ces deux catégories ne représentent en moyenne que 9% du volume total de matériaux de la

¹¹ Décharge contrôlée pour matériaux inertes (ordonnance sur le traitement des déchets du 10.12.1990).

¹² Décharge contrôlée bioactive (ordonnance sur le traitement des déchets du 10.12.1990).

décharge, elles représentent une part très importante du coût total d'élimination, compte-tenu des coûts unitaires très élevés des filières acceptables pour ces fortes teneurs.

Tableau 15 : Volumes estimés de matériaux (en m³) répartis en fonction de leur filière d'élimination, et intervalles de confiance associés. Calculs sur la grille fine 2 m x 2 m x 2 m

Catégorie	PCB (mg/kg ms)	Q0.025	Moyenne	Q0.975	Ratio moyen	Erreur relative sur la moyenne ¹³
1	$x < 0.1$	42 210	50 284	58 888	18%	17 %
2	$0.1 \leq x < 1$	55 515	60 869	66 299	22%	9 %
3	$1 \leq x < 10$	87 118	93 493	99 951	34%	7 %
4	$10 \leq x < 50$	42 865	48 462	53 894	17%	11 %
5	$50 \leq x < 1000$	16 124	20 578	25 562	7%	23 %
6	$x \geq 1000$	2 447	4 373	7 148	2%	54 %

- Localisation de la pollution

La cartographie des probabilités de dépassement en PCB du seuil 10 mg/kg ms (Figure 69) permet de déterminer les profondeurs où se trouve très probablement localisée, sous forme de spots, une grande partie des matériaux les plus contaminés: entre les cotes + 567 m et + 571 m.

L'enveloppe du volume des mailles dont les teneurs en PCB ont plus de 50% de risque de dépasser la valeur de 10 mg/kg ms met en évidence un secteur problématique de plus large extension dans la partie ouest que dans la partie est de la décharge. Les volumes correspondants ont été quantifiés de manière séparée pour les besoins de CSD.

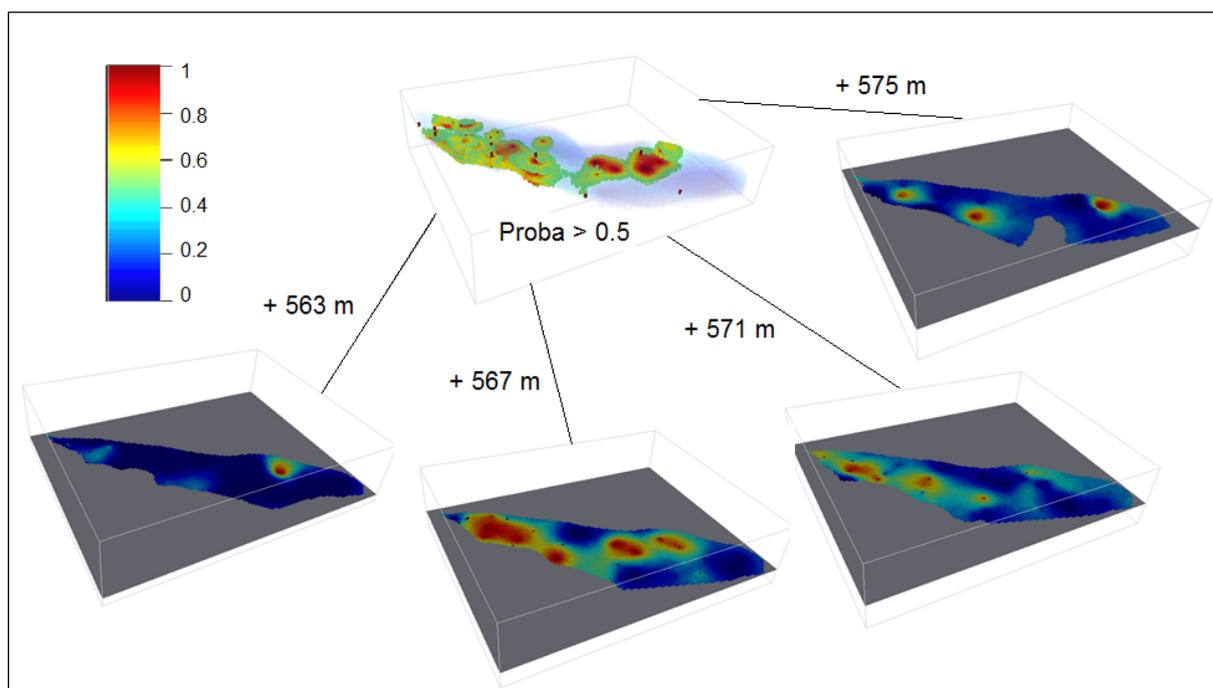


Figure 69 : Cartographie sur la grille fine de la probabilité de dépassement du seuil 10 mg/kg ms. Visualisation du volume correspondant aux probabilités supérieures à 0.5 (figure du haut) et de différentes couches horizontales (figures du bas).

- Influence de la maille (bloc) d'excavation

La répartition des volumes de matériaux dans les différentes classes de teneurs en PCB varie en fonction de la grille de calcul considérée, qui reproduit les dimensions des blocs d'excavation des matériaux et la prise de moyenne induite sur les teneurs. Les estimations géostatistiques (Figure 70)

¹³ $(Q0.975 - Q0.025)/Moyenne/2$.

montrent que la proportion de matériaux de plus faibles teneurs en PCB (< 0.1 mg/kg ms) diminue de 11% alors que la taille des blocs croît horizontalement de 8 à 96 m³. A l'inverse la proportion des matériaux les plus contaminés (≥ 1 mg/kg ms) augmente de 10%. La proportion de matériaux dont les teneurs sont intermédiaires reste stable.

L'augmentation de la proportion de matériaux appartenant aux classes des teneurs les plus élevées avec la taille des mailles peut s'expliquer comme suit : des teneurs extrêmement élevées ont été mesurées dans les matériaux, de sorte que même avec une prise de moyenne, les valeurs de blocs de grande taille restent élevées. Le nombre de blocs de grande taille appartenant aux classes des plus fortes teneurs ne diminue donc pas forcément, alors que le volume unitaire des blocs augmente avec la taille. Le volume total appartenant à ces classes peut donc dans ces conditions augmenter.

Cette influence de la taille des blocs sur la répartition des matériaux dans les filières d'élimination a des répercussions financières, qui peuvent être prédites à partir de la modélisation géostatistique : un coût global plus élevé de dépollution est attendu avec la plus grande taille de blocs.

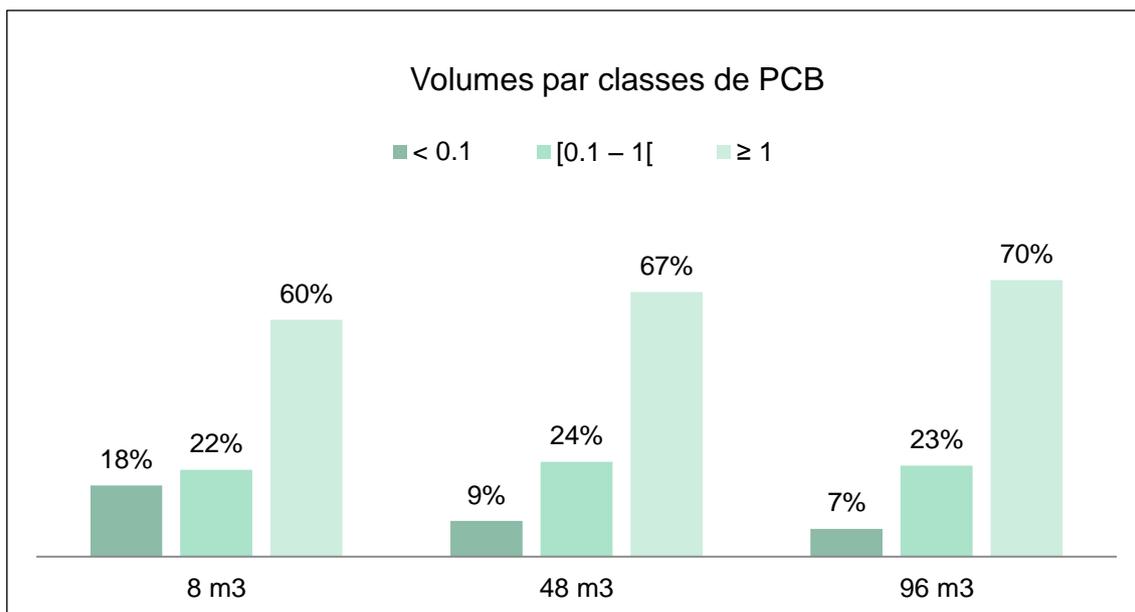


Figure 70 : Répartition des volumes estimés de matériaux contaminés par classe de teneurs en PCB (en mg/kg ms) selon la taille des blocs d'excavation considérés.

8.4.5. Synthèse

L'étude géostatistique a conforté le bureau CSD dans la validité de ses estimations (non géostatistiques) des volumes à dépolluer (contenus dans les intervalles de confiance des estimations géostatistiques) et dans la nécessité de proposer des investigations complémentaires au donneur d'ordre.

L'étude a été utile au donneur d'ordre pour prendre la mesure de l'importance du problème, de la forte incertitude affectant les estimations à ce stade d'investigation et de la nécessité de mettre en œuvre des investigations complémentaires avant toute autre mesure ou prise de décision sur le site.

L'influence de la taille des blocs d'excavation sur la répartition des matériaux dans les filières d'élimination a conduit les géostatisticiens à recommander un tri fin des matériaux dans les secteurs les plus contaminés pour en réduire les coûts d'élimination.

8.5. Site de Fontenay

Fiche réalisée sur la base des informations transmises par Patrick De Moura (CEA), l'étude géostatistique ayant été menée conjointement par le CEA et Geovariances.

8.5.1. Contexte

Le site est celui du CEA de Fontenay-aux-Roses, sur lequel 3 générations d'installations nucléaires ont existé ou existent encore. Dans le cadre de l'assainissement du site, cette étude concerne une zone située aux abords de deux bâtiments et à l'aplomb de l'ancienne douve du Fort.



Figure 71 : Vue de la zone d'étude et des anciens bâtiments.

La contamination est radiologique et atteint des profondeurs importantes, rendant difficiles les travaux de sondages. L'étude historique est primordiale étant donnée la succession de bâtiments et de remblaiements dans cette zone.

8.5.2. Objectifs de l'étude

L'objectif principal est la réalisation d'une caractérisation fiable afin de préparer au mieux la phase de remédiation. Pour cela, des cartes aussi précises que possible associées à des incertitudes quantifiées sont réalisées. Afin de préparer les travaux de remédiation et d'optimiser les déchets radiologiques en fonction des différentes catégories, une analyse de risque est conduite.

8.5.3. Approche mise en œuvre

Une première campagne d'échantillonnage (Figure 72) a été réalisée en 1999, mettant en évidence une contamination radiologique à 4 m de profondeur. En 2007, afin de délimiter l'extension de la pollution, 8 nouveaux sondages ont été effectués, suite auxquels une étude géostatistique a été faite.

En raison du faible nombre de sondages, le comportement spatial horizontal de la contamination n'a pu être clairement défini. La cartographie (Figure 72) a confirmé l'existence d'une contamination à 4-6 m de profondeur mais celle-ci n'a pas pu être bornée au nord et à l'ouest du site.

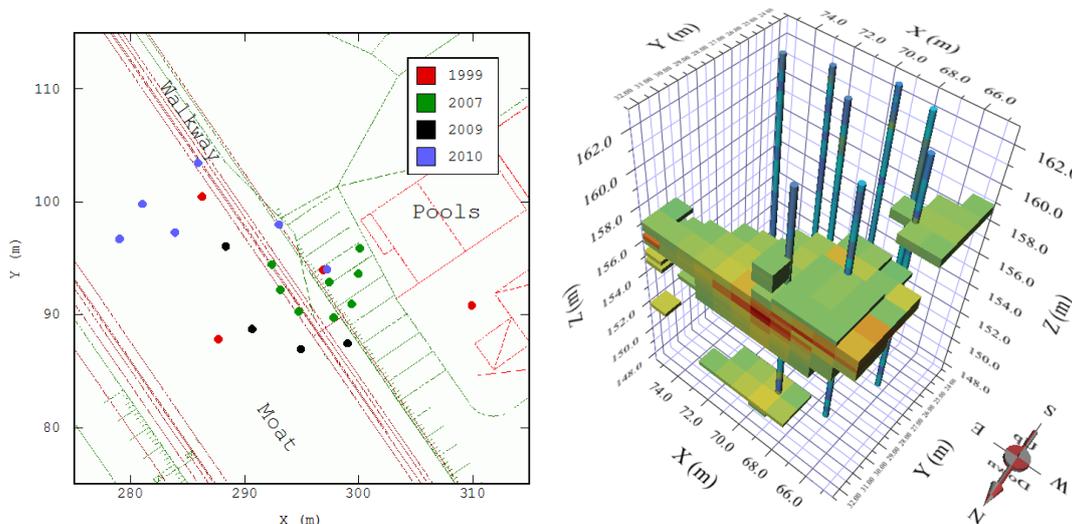


Figure 72 : À gauche : Campagnes de sondages réalisées en 1999 (rouge), 2007 (vert), 2009 (noir) et 2010 (bleu). À droite : première cartographie en 2007.

En 2009 et 2010, l'échantillonnage a été complété afin de délimiter la contamination. Un second niveau de pollution situé à une profondeur de 8 m au niveau de l'ancienne douve a été découvert orientant les interprétations vers une pollution liée à l'ancienne topographie du site.

8.5.4. Synthèse des résultats obtenus et analyse critique

L'étude effectuée à la suite des échantillonnages de 2009 et 2010 a permis de réaliser une cartographie de la contamination fondée sur une analyse variographique plus fiable grâce au plus grand nombre de sondages. La zone contaminée a pu être bornée et reliée à l'historique de la zone (Figure 73 à gauche) : débordement du bassin des eaux « mères » puis écoulement et remblaiement de la douve et du trottoir avec des matériaux contaminés au moment de l'implantation de la 2^{ème} génération de bâtiments.

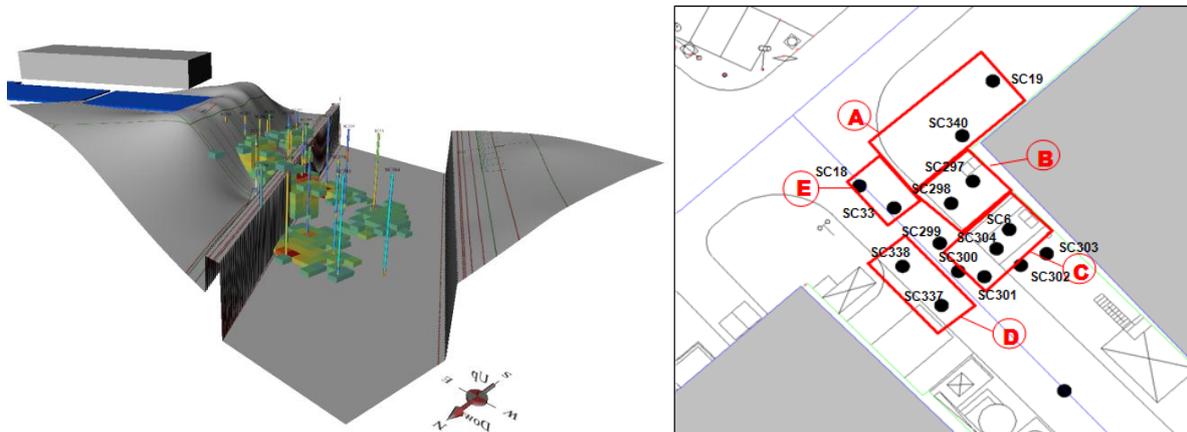


Figure 73 : À gauche : cartographie de la probabilité de dépassement de seuil (seules les zones à plus de 30% de risque apparaissent) et ancienne topographie du site avec bassin des eaux « mères » et douve. À droite : décision de découpage du site en plusieurs zones d'excavation.

L'analyse de risques conduite sur le site a finalement permis d'optimiser l'assainissement. L'aire investiguée a été découpée en plusieurs zones excavables mécaniquement et de formes géométriques simples (Figure 73 à droite), à partir du traitement géostatistique des données. Pour chacune des zones, un sondage de référence a permis de réaliser une étude d'optimisation coût/avantage pour le scénario de réutilisation du site : « chantier de construction d'un bâtiment » et ainsi de déterminer les profondeurs optimales d'assainissement à partir :

- de la détermination d'un spectre type par zone à partir de ce sondage de référence,
- de la détermination du terme source par couche et par zone,
- du calcul d'impact après assainissement en fonction de la profondeur,
- de la détermination de la profondeur d'assainissement optimale et des volumes de déchet.

Malgré des difficultés liées à une grande hétérogénéité dans les sondages (longueurs d'échantillon différentes, limites de détection différentes entre campagnes, contamination croisée due à la technique de sondage en 1999...), l'approche itérative a ici permis de délimiter la contamination et de comprendre sa probable mise en place, les résultats obtenus permettant une optimisation de la gestion des déchets.

9. Analyse critique de la situation actuelle, perspectives et axes de développement possibles

Sur la base de l'ensemble des travaux présentés dans le rapport, ce dernier chapitre propose une analyse critique de l'utilisation de la géostatistique dans le cadre d'études de sites et sols pollués.

Le premier paragraphe dresse un bilan de l'utilisation actuelle de la géostatistique, synthétise les bénéfices qui lui sont reconnus et liste les problèmes qui subsistent aujourd'hui. Les leçons que l'on peut en tirer et les recommandations sont détaillées au second paragraphe. Le 3^{ème} paragraphe passe en revue les questions que se posent usuellement les praticiens au sujet de la géostatistique et de sa mise en œuvre. Le dernier paragraphe suggère plusieurs voies de recherche sur le sujet, ayant des applications métiers.

9.1. Bilan de l'utilisation actuelle de la géostatistique

9.1.1. Utilisation opérationnelle

L'enquête menée auprès des professionnels montre que la géostatistique a été mise en œuvre durant les 15 dernières années sur un nombre significatif de sites correspondant à des activités et des problématiques très variées.

Les études apparaissent fréquemment réalisées par des personnes de bon niveau en géostatistique et sont perçues pour une bonne partie d'entre elles comme un succès, qui peut être total ou partiel. Les objectifs visés par les études concernaient en général la cartographie de la pollution en place et la quantification des volumes de sols à dépolluer.

Les acteurs qui y ont été confrontés évoquent l'intérêt de l'approche géostatistique pour :

- visualiser la pollution en 2 ou 3 dimensions, en appui à la réflexion ou à la communication sur un site ;
- évaluer les volumes de sols à dépolluer, et les incertitudes et risques financiers associés ;
- optimiser une nouvelle campagne de reconnaissance sur la base des informations déjà collectées.

Le rapport coût / bénéfice d'une modélisation géostatistique est également jugé positivement par une grande partie des participants à l'enquête.

Néanmoins, plusieurs problèmes sont régulièrement rencontrés et contribuent à une déception vis à vis des résultats issus de certaines études :

1. Inadéquation entre le cas rencontré (site, données) et les résultats attendus de la modélisation géostatistique. Il ne peut par exemple être attendu de grande précision sur une estimation de volume ou sur la délimitation d'une pollution si les données sont très peu nombreuses, mal réparties, ou de médiocre qualité (p.ex. grande hétérogénéité du support de l'information), ou bien encore si le phénomène de pollution est très hétérogène (faible continuité spatiale). La modélisation peut même dans certains cas être impossible (p.ex. nombre de données insuffisant pour calculer un variogramme expérimental). Certaines études ont pu être réalisées dans des situations où leur pertinence pouvait être mise en doute dès le début en analysant les caractéristiques du site ou des données, et ont conduit à des résultats inexploitablement décevants.
2. Problèmes de communication entre les nombreux acteurs (donneur d'ordre, bureau d'étude en charge du diagnostic, géostatisticien, entreprise de dépollution, autorité). La personne en charge de l'étude géostatistique n'est usuellement pas considérée comme un interlocuteur-clé du projet : elle est peu impliquée en amont comme en aval. Elle doit pourtant pouvoir communiquer avec chacun des autres acteurs pour être en mesure de fournir des résultats adaptés à la situation :
 - Avec le donneur d'ordre. Le géostatisticien doit pouvoir clairement connaître les besoins du donneur d'ordre pour fournir des résultats de modélisation adéquats. Le donneur d'ordre doit de son côté pouvoir comprendre les résultats produits, la nature des incertitudes, l'intérêt d'investigations complémentaires, et les utilisations possibles du modèle géostatistique pour apprécier par exemple les risques financiers encourus selon le niveau de précision des estimations de volumes et la solution de dépollution choisie.
 - Avec le bureau d'étude. Le géostatisticien n'est en général pas impliqué dans la préparation des plans d'échantillonnage alors qu'il pourrait fournir des recommandations pour améliorer la précision d'estimations futures. Le géostatisticien est souvent sollicité

bien après la fin des investigations, alors que le bureau d'étude est « passé à autre chose », se retrouvant alors seul face aux incohérences ou problèmes de données.

- Avec l'entreprise de dépollution. Il est important que la géostatistique puisse fournir des résultats directement utilisables en dépollution, en prenant en compte d'éventuels changements de conditions de réhabilitation (p.ex. nouvelles tailles de mailles d'excavation, nouveaux projets de réaménagement suite à un changement d'acheteur,...). Un modèle construit pour un scénario initial de réhabilitation doit en effet être ajusté à tout nouveau scénario pour correspondre aux travaux réellement entrepris, cette mise à jour pouvant en général être réalisée à moindre coût sur la base des résultats géostatistiques déjà produits.
- Avec l'autorité. L'autorité en charge de l'évaluation du dossier doit pouvoir comprendre les résultats produits, la nature des incertitudes observées, et les interpréter dans le cadre réglementaire en vigueur. **L'absence de quantification des incertitudes par des méthodes empiriques ou déterministes ne doit par exemple pas être interprétée comme une absence d'incertitude. De la même façon, la quantification des incertitudes par les méthodes géostatistiques ne doit pas être perçue comme un défaut de la méthode.**

Plusieurs freins à une utilisation plus récurrente de la géostatistique ont par ailleurs été identifiés :

3. Surcoût de l'étude : comment convaincre le donneur d'ordre d'investir dans une méthodologie qui n'est pas recommandée, décrite ou simplement évoquée dans les guides méthodologiques ? Aujourd'hui, l'étude géostatistique est réalisée en surplus des étapes classiques de caractérisation des sites, ce qui n'aide pas à en optimiser les coûts. Ce coût supplémentaire, combiné à une absence de perception claire de la valeur ajoutée que peut apporter une étude géostatistique, constitue un réel frein.
4. Position des autorités : comment convaincre le donneur d'ordre du bien-fondé d'une démarche dont les avantages et inconvénients ne sont pas discutés dans les guides méthodologiques officiels ? Quel intérêt a-t-il à maîtriser le support d'excavation et à utiliser des techniques de modélisation sophistiquées alors que les références officielles concernant le choix d'une maille de dépollution, les programmes d'échantillonnage pour les contrôles après dépollution, etc. n'y sont pas détaillés ?
5. Logiciels : certains participants à l'enquête ont souligné le manque d'outils logiciels adaptés au domaine des sites pollués. Des outils peu coûteux, faciles à utiliser, conviviaux, et de préférence en langue française sont demandés.
6. Formation et information : un manque de formation des professionnels aux méthodes géostatistiques et aux logiciels d'application est également relevé, ainsi qu'un manque d'information des autres acteurs intervenant dans la gestion des sites pollués.
7. Démonstrations : en dépit des efforts importants consentis durant les dernières années, que ce soit par le biais de communications orales ou écrites de professionnels ou par les activités de promotion d'associations telles que GeoSiPol, le nombre de cas réels rendus publics permettant de démontrer dans de bonnes conditions la validité de la prédiction de volumes contaminés par une démarche géostatistique est encore jugé trop faible. Il est vrai que les cas démonstratifs pouvant être présentés au public sont assez peu nombreux, en raison de fréquents problèmes de confidentialité, et du peu d'informations disponibles sur les conditions réelles de dépollution à confronter au modèle prédictif (les conditions de tri des sols en dépollution ne sont pas forcément conformes aux critères utilisés lors de la modélisation, des changements de la maille d'excavation peuvent avoir été réalisés en cours de chantier, etc.).

9.1.2. Maturité méthodologique

La synthèse des dernières publications scientifiques sur le thème montre que les démarches géostatistiques adaptées aux sites et sols pollués sont aujourd'hui bien maîtrisées par les spécialistes. Les thèmes abordés par les équipes de recherche laissent transparaître encore quelques légères difficultés méthodologiques. Ces dernières peuvent concerner des points techniques de la modélisation, tels que la question de la transformation inverse après anamorphose ou bien encore l'intégration correcte de l'historique du site.

L'étude du contexte actuel de mise en œuvre de la géostatistique montre en revanche que dans la pratique, des questions se posent encore sur les conditions d'une mise en œuvre fructueuse d'une étude géostatistique, telles que : dans quel cas dois-je, en tant que donneur d'ordre, prescrire une telle étude ? Dans quel cas dois-je, en tant que bureau d'étude, en proposer une ?

9.2. Leçons à tirer et recommandations

Plusieurs pistes d'amélioration peuvent être avancées pour résoudre les problèmes et lever les freins discutés ci-dessus.

9.2.1. Adapter les résultats visés par la modélisation géostatistique au cas rencontré (site, données)

Il est fondamental qu'il y ait, en amont des investigations, une réflexion sur les objectifs à atteindre, la nature des investigations ET la pertinence d'une modélisation géostatistique. Deux outils sont proposés au paragraphe 9.3 dans cette optique :

- Une liste des questions à se poser afin de garantir autant que possible la faisabilité de l'approche ainsi que son succès,
- Un tableau des relations entre objectifs à atteindre et niveau de sophistication de l'étude géostatistique qu'il conviendrait de réaliser.

9.2.2. Améliorer la communication entre les différents acteurs

Deux voies d'amélioration de la communication entre la personne en charge de l'étude géostatistique et les autres acteurs sont proposées :

- **Une sensibilisation des différents acteurs à la méthodologie géostatistique, à ses concepts, méthodes et aux hypothèses de travail ;**

Cette suggestion implique un effort d'information des acteurs impliqués dans la gestion des sites pollués. Une liste non exhaustive des formations actuellement délivrées sur le thème a été dressée au paragraphe 5.2. Un retour critique demanderait à être réalisé par les professionnels pour évaluer si cette offre est suffisante et adaptée et pour, le cas échéant, organiser d'autres types de formations ou actions de sensibilisation. Lorsque l'objectif est de sensibiliser les parties prenantes, un séminaire d'une journée semble par exemple plus adapté que des formations plus détaillées qui sont davantage destinées à des personnes souhaitant mettre elles-mêmes en œuvre ces approches géostatistiques.

- **Une plus forte implication du géostatisticien dans le projet et une familiarisation avec les contraintes métiers.**

Cela requiert une remise en cause des pratiques actuelles d'intégration d'une modélisation géostatistique dans la démarche générale d'évaluation des sites pollués. La réalisation de l'étude géostatistique au sein des bureaux d'étude réalisant les diagnostics peut être un atout, sous réserve d'une solide formation en géostatistique de l'ingénieur en charge de l'étude (attention aux études géostatistiques improvisées !). De ce point de vue, la modélisation géostatistique ne diffère bien entendu pas d'autres approches quantitatives qui demandent à être maîtrisées. L'implication d'un géostatisticien spécialisé en sous-traitance, impliqué dès les premières phases d'investigation, mais aussi plus tardivement pour que le donneur d'ordre puisse utiliser à bon escient les résultats géostatistiques dans sa prise de décision, est également une solution adaptée.

9.2.3. Analyser le coût bénéfice d'une étude géostatistique

Le coût d'une étude géostatistique doit être bien entendu mis en balance avec le bénéfice obtenu, que celui-ci soit réalisé lors des travaux de dépollution ou qu'il se traduise par une meilleure compréhension de la pollution et donc une meilleure prise de décision.

Un bénéfice important est la quantification de l'incertitude, donc du risque pris par le donneur d'ordre, financier, environnemental ou sanitaire, lors de sa prise de décision. La mise en œuvre d'outils capables de modéliser l'incertitude nécessite néanmoins des actions de sensibilisation pour que cela soit considéré comme un atout, un non pas comme un élément néfaste nuisant aux intérêts représentés par le décideur.

La perception négative du coût occasionné par une étude géostatistique peut être également contrée par un raisonnement en coût global de projet, qui résulte à la fois des coûts d'investigation et des coûts de dépollution. Il est en effet aujourd'hui reconnu par de nombreux acteurs qu'une investigation détaillée et précise, si elle se traduit par un coût plus élevé, conduit surtout à d'importantes économies en phase de réhabilitation (voir Figure 74 suivante) (bien que certains donneurs d'ordre affichent un bilan différent en annonçant, pour certains types de friches particulièrement hétérogènes, des coûts de diagnostic de l'ordre de 80% par rapport au coût total du projet).

Le coût d'une étude géostatistique dépend par ailleurs de l'objectif à atteindre. Dans certains cas, une analyse exploratoire des données est suffisante pour répondre aux questions posées, avec un gain d'information important pour un coût marginal.

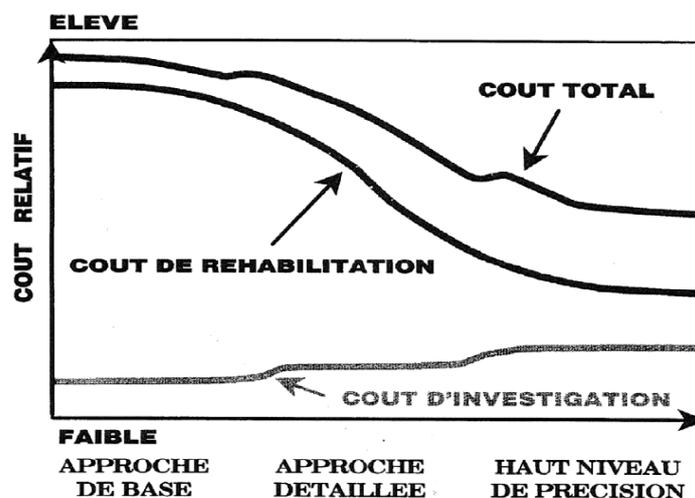


Figure 74 : Lien entre niveau de détail lors des investigations (abscisse) et coûts associés (d'après (Hubé, 2008)).

9.2.4. Présenter la géostatistique dans les documents méthodologiques officiels

La discussion des avantages et inconvénients des méthodes géostatistiques dans les guides méthodologiques officiels sur les sites pollués serait également un atout important. L'état des lieux de la documentation officielle évoquant la géostatistique (cf. chapitre 5.3) a mis en évidence des situations très diverses selon les pays. Les Etats-Unis, le Québec et la Wallonie décrivent de manière assez détaillée les conditions d'utilisation de la géostatistique pour caractériser les sites pollués, alors que d'autres pays comme l'Allemagne ou la France n'évoquent ces méthodes que de manière très sommaire pour un usage très limité.

Une telle intégration requiert probablement une sensibilisation des autorités en charge du respect de la réglementation (cas des DREAL en France), pour une meilleure compréhension de l'utilité de la géostatistique, de ses conditions d'application et de ses limites.

9.2.5. Disposer d'outils logiciels adaptés

L'offre de logiciels dédiés aux sites contaminés est en réelle progression, comme le montre l'inventaire non exhaustif dressé au § 5.1. Elle témoigne surtout de l'évolution de l'utilisation des méthodes géostatistiques dans le domaine des sites et sols pollués, avec l'apparition de logiciels dédiés aux sites et sols pollués tels que SADA, Kartotrak ou Soil Remediation.

Outre ces solutions dédiées au domaine des sites pollués, l'offre est composée de logiciels de géostatistique, de SIG intégrant des méthodes géostatistiques, de logiciels de visualisation ou de modélisation géologique intégrant des outils géostatistiques ou de langages de programmation et environnements de développement permettant de développer les outils de calcul nécessaires à une modélisation géostatistique.

Il se pose bien évidemment le problème du prix, qui doit se justifier par les gains attendus de l'utilisation des méthodes géostatistiques dans les caractérisations des sites. Indépendamment de ses caractéristiques techniques (système d'exploitation, modélisation 2D ou 3D, compatibilité avec d'autres logiciels, etc.) et financières, nous conseillons de considérer les critères suivants dans le choix du logiciel : 1) complexité des études amenées à être traitées et de leurs objectifs, 2) niveau de connaissance des méthodes géostatistiques et des méthodes de programmation des utilisateurs et temps à disposition, 3) appui à l'utilisation du logiciel et mises à jour fournies par l'organisme ayant développé le logiciel.

9.2.6. Faire un effort de formation et d'information

Il existe actuellement deux types de formations en géostatistique (cf. liste non exhaustive au paragraphe 5.2) : des formations destinées à prendre en main un logiciel de géostatistique ou à développer ses propres outils, et des formations visant à présenter les concepts de la géostatistique et ses conditions d'application. Les professionnels amenés à se former doivent trouver un bon

compromis entre formations théoriques qui peuvent rebuter et cours « presse-boutons » ne permettant pas la compréhension des concepts de base. Quelques réactions des participants à l'enquête laissent penser que cette offre n'est pas forcément complètement suffisante ni adaptée et devrait, le cas échéant, être renforcée par d'autres types de formations ou actions de sensibilisation pour les publics concernés (p.ex. autorités, donneurs d'ordre, entreprises de dépollution).

Des séminaires d'une journée sembleraient répondre à la demande des personnes souhaitant être sensibilisées plus que réellement formées à la mise en œuvre d'une approche géostatistique.

9.2.7. Présenter des cas réels de validation des volumes contaminés

Un effort important doit encore être mené de la part de l'ensemble de la profession pour rendre publiques des études faisant la comparaison entre les volumes à dépolluer estimés par une démarche géostatistique en fin de diagnostic et les volumes réellement dépollués en phase de réhabilitation de site, car ce type de confrontation est considéré comme une des démonstrations les plus convaincantes de l'intérêt de la géostatistique pour les sites pollués.

Ce type de comparaison implique pour le géostatisticien une modélisation rigoureuse des conditions dans lesquelles il est prévu de réaliser le tri des sols par filières d'élimination (en cas de dépollution avec excavation des matériaux). Cela signifie également pour l'entreprise de dépollution de suivre fidèlement le schéma convenu de tri des matériaux ; en cas d'écarts au protocole, ceux-ci seront documentés précisément pour que le géostatisticien soit en mesure d'adapter son modèle en conséquence.

9.2.8. Normaliser les prestations de géostatistique appliquée aux sites et sols pollués

La normalisation des prestations en géostatistique des sites et sols pollués donnerait la possibilité aux acteurs du domaine d'écarter les études ne présentant pas de fiabilité suffisante, évitant les déceptions rencontrées au cours de ces dernières années. Elle obligerait aussi la profession à établir un standard reconnu par tous.

D'autres domaines d'application possèdent déjà leurs textes de référence en géostatistique. Dans le domaine minier, le code JORC (Joint Ore Reserves Committee of The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2004) fait par exemple référence. Dans le domaine des sites et sols pollués, l'ASTM (American Society for Testing and Materials) a produit plusieurs guides relatifs à la mise en œuvre de la géostatistique en 1996, qui sont depuis ré-approuvés en l'état (ATSM, 2010a ; ATSM, 2010b ; ATSM, 2010c). Ces guides, bien que relativement formels et peu pratiques, fournissent néanmoins quelques éléments de décision lors de l'estimation du variogramme, de la cartographie par krigeage ou de la réalisation de simulations.

9.3. Décider de la pertinence d'une étude géostatistique

Ce paragraphe est destiné à répondre aux questions fréquemment posées sur l'utilisation de la géostatistique pour caractériser les sites pollués, et à aider à apprécier l'intérêt d'une étude géostatistique à un stade d'investigation et pour un objectif donnés.

1. « Quand dois-je me poser la question de savoir si la géostatistique est pertinente sur mon site ? »

Idéalement dès la fin des études historiques et documentaires et des premières investigations techniques (diagnostics) mettant en évidence une pollution (levée de doute) qui nécessitera très probablement des mesures de réduction du risque. En effet, se poser ces questions très tôt permettra, si la géostatistique apparaît pertinente, d'optimiser les stratégies d'échantillonnage. Une démarche géostatistique pourra néanmoins être initiée ultérieurement, en cours ou après la phase d'investigation, avec juste une restriction sur les possibilités d'optimisation de l'échantillonnage. Le paragraphe 3.3 « Quels outils pour quels objectifs ? » peut aider à se déterminer sur cette question en décrivant les objectifs qui peuvent être attendus d'une étude géostatistique aux différentes étapes de caractérisation et de réhabilitation d'un site pollué. L'intérêt de la géostatistique peut être limité dans certaines situations, selon les caractéristiques de la pollution et des données disponibles : c'est ce qui est discuté dans les points suivants.

2. « Ai-je ou puis-je acquérir suffisamment de données ? »

Le besoin de collecter des données de terrain découle à la fois d'une suspicion de pollution et d'une méconnaissance de sa répartition spatiale (historique insuffisant, site hétérogène, etc.).

Dès lors que ce besoin conduit à l'acquisition de plus de 10-15 données visant à caractériser la pollution au sein d'un site, des outils exploratoires, statistiques et géostatistiques pourront

être utilisés, ces données pouvant être de différentes natures (analyses chimiques de laboratoire, mesures sur site, etc.). Les objectifs d'étude pouvant être atteints seront d'autant plus ambitieux que le nombre de données à disposition est important, comme résumé au Tableau 16 :

- Dès que 10 à 15 données sont disponibles pour renseigner la variable d'intérêt, les outils statistiques de base de l'analyse exploratoire peuvent être utilisés pour contrôler la qualité des résultats, en constituer une synthèse et en fournir une interprétation (en complément des tableaux exhaustifs de données, peu pratiques pour saisir rapidement les principales caractéristiques d'une pollution).
- Avec plus de 20 données sur la variable d'intérêt, dès qu'une étude variographique est possible, une cartographie de la pollution peut être en général établie, en alternative aux cartes de points renseignés ou méthodes d'interpolation classiques (sans quantification de l'incertitude). La cartographie pourra représenter les variations de la pollution dans les 3 directions de l'espace si le nombre de données sur la verticale est suffisant (> 3-4 par sondage). Dans le cas contraire, une cartographie 2D par niveau lithologique ou bien sur la totalité de la hauteur échantillonnée sera mise au point.
- Il est recommandé de disposer d'au minimum 25-30 données sur la variable d'intérêt pour une modélisation plus sophistiquée destinée à évaluer des volumes ou des tonnages de matériaux contaminés, et à en estimer la localisation. Les enjeux sont en effet à ce stade suffisamment importants pour soigner la modélisation en se basant sur une bonne connaissance de la structure spatiale du phénomène de pollution. La précision du modèle sera d'autant plus grande que le nombre de données sera augmenté (avec si possible optimisation de la position des points de données), sauf cas particulier de milieu très hétérogène (p.ex. remblais très remaniés).

Remarque : sur de petits sites et lorsque la compréhension de la pollution est bonne, le nombre de mesures effectuées est souvent restreint. Il n'est alors pas pertinent de vouloir interpoler les mesures réalisées, les incertitudes associées à la modélisation étant en général très élevées. Il faut surtout se méfier dans pareil cas d'interpolations rapides et leur préférer une représentation simple des mesures réalisées (par points renseignés).

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 : statistiques élémentaires, histogrammes, corrélations, cartes de points renseignés.	Quelques heures
Cartographie de la pollution	> 20	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)	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

3. « Mes données sont-elles de qualité suffisante ? »

La géostatistique est parfois perçue comme posant des exigences particulières quant à la qualité des données de diagnostic. Il est important de garder à l'esprit qu'elle ne fait en ce sens que formaliser des recommandations beaucoup plus générales. En effet, au vu de la complexité des phénomènes à caractériser, il est fondamental de pouvoir s'appuyer sur des données de qualité. Cela implique une homogénéité des protocoles d'échantillonnage et d'analyse, ou tout du moins une connaissance de ces protocoles. L'homogénéité entre les

différentes campagnes d'investigation est également importante. La localisation précise des mesures sur le site est fondamentale, tout comme une bonne répartition des données au sein du site (éviter d'avoir l'ensemble des données concentrées exclusivement au droit du point chaud pressenti...). Il est à noter que ces recommandations sont de plus en plus prises en compte dans la pratique.

Pour toutes ces raisons, il est important que la personne en charge de la modélisation géostatistique soit impliquée lors des réflexions sur la stratégie d'échantillonnage, avant les étapes d'investigation à proprement parler.

4. « Mon site n'est-il pas complètement hétérogène ou trop complexe ? »

Certains sites peuvent s'avérer complètement hétérogènes ; cela est typiquement le cas de sites ayant fait l'objet de remaniements sans logique évidente de l'ensemble des terres. Une absence de continuité spatiale de la contamination peut alors être observée, rendant très difficile la sélection des terres compatibles ou non par rapport à un dépassement de seuils (des sols « très pollués » peuvent se trouver juxtaposés à des sols « sains » à toutes les échelles d'observation du phénomène).

Une modélisation géostatistique sophistiquée s'avère peu pertinente dans pareil cas, puisqu'elle ne permettra pas de prévoir la classification des terres avec un niveau de confiance acceptable.

La géostatistique concerne néanmoins un intérêt dans ces situations pour mettre en valeur l'incertitude et préciser les conditions d'investigation suffisantes pour valider cette hétérogénéité (sans multiplier inutilement les données collectées).

Le bienfondé d'une étude géostatistique est également discutable en présence de sites particulièrement complexes, pour lesquels il est illusoire d'espérer prédire les teneurs dans les sols à partir des investigations réalisées. Le modèle conceptuel du site reste alors un outil fondamental. Certains modèles peuvent être intégrés dans une approche géostatistique (p. ex. anisotropie de la pollution liée à une lithologie particulière, structures enfouies bien identifiées grâce à des mesures géophysiques), mais cela n'est pas systématique (p.ex. historique complexe et difficilement quantifiable). En préalable à l'étude géostatistique, il importe donc de se demander si les principaux éléments du modèle conceptuel sont capturés par les investigations ou peuvent être décrits et intégrés dans l'approche géostatistique. Si cela n'est pas le cas, il pourra découler de la modélisation géostatistique une incertitude très élevée et éventuellement peu réaliste, liée au fait que les mesures à elles seules ne permettent pas de fournir une image fiable de la pollution.

5. « Combien va me coûter une étude géostatistique et pour quel bénéfice ? Le jeu en vaut-il la chandelle ? »

Malgré les précautions prises à l'issue des questions précédentes, une absence de continuité spatiale marquée de la pollution ne peut être totalement exclue. Dans ce cas, la précision du modèle géostatistique sera mauvaise sauf à multiplier à l'extrême les points d'investigation. La géostatistique aura permis de démontrer cela, pour un investissement en temps/argent d'analyse exploratoire qui est usuellement léger.

Une fois la continuité spatiale quantifiée, il est alors possible de réaliser une estimation rigoureuse des zones contaminées, de quantifier les incertitudes, etc. L'application de la géostatistique est alors classique, le coût/temps nécessaire à l'étude dépendant alors des objectifs à atteindre. Le Tableau 16 fournit une estimation du temps nécessaire pour atteindre différents objectifs d'étude géostatistique, à convertir en coûts selon les tarifs en vigueur des prestations ingénieur.

6. « En tant que donneur d'ordre, quelles exigences poser en vue d'une prestation incluant une étude géostatistique et comment évaluer la qualité des réponses ? »

Lors de la rédaction d'un cahier des charges, il est important de demander au répondant les informations suivantes :

- Expérience / Compétence du personnel,
- Références en la matière (projets),
- Programme de travail proposé :
 - Objectifs visés par l'étude géostatistique, en cohérence avec les données disponibles ou à acquérir,

- Méthodes géostatistiques envisagées,
 - Description des différentes étapes de travail,
 - Résultats produits,
 - Protocoles de suivi et de contrôle de la validité des résultats (contrôle qualité),
 - Types et étapes de communication envisagés avec les acteurs du projet pour assurer l'adéquation entre les résultats de modélisation et les attentes des acteurs,
 - Eventuelles difficultés attendues liées à la nature du site et à sa complexité, scénarii envisagés pour préciser ces difficultés et, dans la mesure du possible, les lever.
- Logiciels utilisés,
 - Exigences liées à la communication et aux livrables :
 - Restitution des données d'entrée sur lesquelles se base la modélisation, des résultats et des paramètres de modélisation, sous forme de fichiers éditables. Les informations fournies doivent être suffisamment détaillées pour permettre le cas échéant de faire réaliser un contrôle qualité externe de l'étude géostatistique,
 - Production d'illustrations adaptées aux besoins du donneur d'ordre (plans et sections 2D, blocs diagrammes 3D, animations vidéo,...),
 - Rapports et présentations orales.

Le donneur d'ordre veillera à ce que le programme de travail proposé soit en cohérence :

- avec l'état de l'art en la matière (p.ex. guide méthodologique GeoSiPol, présente étude, normes ASTM,...),
- avec les objectifs d'étude visés. Le paragraphe 3.3 du présent rapport peut être utilisé à cet effet pour relier objectifs d'étude de caractérisation et outils géostatistiques appropriés.
- avec les données à disposition ou à acquérir. Le paragraphe 9.3 de ce rapport peut être utilisé dans cette optique.

Les informations listées ci-dessus permettront dans la plupart des cas d'évaluer la compétence du répondant dans le domaine et sa capacité à mener à bien les travaux demandés. Le cahier des charges pourra bien entendu être affiné en fonction de la spécificité du site et de la complexité de la situation. L'appui d'un géostatisticien pourra se révéler utile pour évaluer les réponses aux appels d'offre les plus complexes.

9.4. Perspectives

Le chapitre 6 a dressé un panorama des dernières innovations scientifiques dans le domaine de la géostatistique appliquée aux sites et sols pollués.

Le présent paragraphe dresse une liste de propositions d'axes de recherche qui permettraient de répondre à certains problèmes rencontrés par les professionnels des sites pollués.

9.4.1. Couplage géostatistique et risques sanitaires

L'évaluation quantitative des risques sanitaires liés à une pollution est réalisée à l'aide de modèles spécifiques, dans lesquels sont introduits de nombreux paramètres et variables caractérisant à la fois la population exposée, les voies d'exposition et la pollution. Nombre d'entre eux sont entachés d'incertitudes, de sorte que le résultat final de l'évaluation, indice de risque ou excès de risque individuel, est soumis à l'influence cumulée de toutes ces sources d'erreurs.

Le couplage de ces modèles à un modèle géostatistique permettrait de tenir compte de l'incertitude liée la variabilité spatiale de la pollution dans les calculs de risque sanitaire.

Ce couplage permettrait également de « spatialiser » le risque sanitaire, c'est-à-dire d'estimer des valeurs de risque différentes par secteurs géographiques, ce qui aurait un intérêt pour les réhabilitations de sites pollués de grande taille qui s'effectuent souvent avec des objectifs de réaménagement différents par secteurs, impliquant des exigences variables de réduction des risques (p.ex. exigences plus sévères pour un secteur amené à être réutilisé en crèche ou en jardin potager, plutôt qu'en parking). On obtiendrait ainsi une cartographie des risques sanitaires tenant compte, par secteur, des caractéristiques de la population exposée, des caractéristiques techniques du projet de réaménagement mais aussi des concentrations en polluants qui y ont été estimées (localisation des locaux et autres équipements par rapport à la pollution).

La synthèse bibliographique a mis en évidence plusieurs travaux effectués dans ce sens dans différents pays (voir paragraphe 6.2). En France, un tel couplage a été étudié par (Guyonnet, Dubois, et al., 2003) sur le site Metaleurop de Noyelles-Godault (62).

Un travail de recherche complémentaire apparaît nécessaire pour étudier en détail les conditions de couplage des modèles, en tester l'applicabilité sur des sites réels et préciser comment les résultats qui en découlent peuvent être utilisés de manière opérationnelle et validés par l'administration. De manière plus générale, un travail méthodologique serait utile pour clarifier les conditions d'intégration des différentes sources d'incertitude, spatiales ou non, dans les calculs de risques sanitaires.

9.4.2. Intégration des informations qualitatives indirectes

La géostatistique permet d'intégrer dans les modèles des informations indirectes de la pollution mesurées ponctuellement, qu'elles correspondent à des variables continues, telles que des mesures XRF de terrain, ou discontinues telles que la nature des terrains traversés. Les méthodes actuelles permettent également d'intégrer des données indirectes quantitatives mesurées de façon quasi-exhaustive sur l'ensemble du site, comme par exemple des mesures géophysiques.

Mais certaines difficultés méthodologiques subsistent dans l'intégration d'informations indirectes qualitatives connues de façon relativement extensives sur le site, telles que l'historique du site et la localisation des sources de pollution potentielles, ou le schéma conceptuel des relations suspectées entre sources, vecteurs et cibles de la pollution. En effet, un historique peut par exemple contribuer à identifier certaines sources de pollution sans pour autant être exhaustif. Quel poids lui attribuer ? Comment l'intégrer explicitement dans le modèle ? Comment affiner le modèle probabiliste par l'intégration de ces informations ?

Certaines approches géostatistiques permettent de découper la zone d'étude en strates au sein desquelles des comportements plus homogènes de la pollution sont attendus. Néanmoins, découper en sous-zones conduit à diminuer le nombre de mesures par zone et donc potentiellement la robustesse de la modélisation. Quel compromis trouver entre robustesse du modèle géostatistique et prise en compte de spécificités locales ? Là encore, un réel travail méthodologique semblerait utile, en partant de cas réels de sites bien connus et investigués. Ces sites permettraient de se placer dans des conditions de connaissance dégradées et d'évaluer la pertinence d'approches intégrant des informations historiques parcellaires.

9.4.3. Valorisation expérimentale d'informations indirectes (MIP, géophysique)

Il est apparu lors de l'étude qu'en dépit de leur intérêt, les informations indirectes sont aujourd'hui encore peu mises en œuvre sur des sites réels et encore plus rarement intégrées explicitement lors de la modélisation de la pollution. Certaines études méthodologiques ont déjà été réalisées sur le sujet, mais souvent dans un cadre de recherche et développement, et en restant limitées à un certain type de mesures indirectes (cas du projet Reperage, combinant mesures XRF et géostatistique, testée sur site réel mais dans un cadre recherche).

Il serait encore utile de démontrer comment valoriser des mesures indirectes, telles que des diagraphies MIP ou des mesures géophysiques, par un traitement géostatistique, sur un site témoin mis à disposition pour les besoins de l'expérimentation. Ce site permettrait par exemple de comparer, en grandeur réelle, des estimations menées avec ou sans mesures indirectes, avec un plus ou moins grand nombre de données, des répartitions variées des données, etc.

9.4.4. Evaluation du flux massique de polluant (hydrocarbures chlorés) à l'aide de mesures indirectes (p.ex. multilevel) et de géostatistique

Du fait de leurs propriétés très particulières (p. ex. plus grande densité que l'eau, volatilité), les hydrocarbures chlorés sont très difficiles à localiser dans le milieu souterrain. Dans les eaux souterraines, des dispositifs de prélèvement multiniveaux (multilevel) sont utilisés pour tenter de capter la variabilité spatiale de ces substances à l'échelle décimétrique, voire centimétrique. Disposés dans un plan vertical perpendiculairement à la direction d'écoulement des eaux, en aval de la source de pollution, ces dispositifs permettent d'évaluer le flux de polluants sortant d'un site pollué, information essentielle pour définir des mesures de mise en sécurité du site. Mais se posent alors les questions suivantes : de combien de dispositifs multiniveaux a-t-on besoin pour obtenir une estimation suffisamment précise du flux dans le plan ? Sur la verticale, combien de prélèvements d'eau souterraine réaliser ? Quelle est l'incertitude associée à cette estimation de flux ?

Alors que la caractérisation des sites pollués aux hydrocarbures chlorés constitue encore à l'heure actuelle un défi de taille pour la profession, il serait utile de mener un travail de recherche et développement visant à déterminer les conditions optimales de quantification du flux de polluant, en se basant sur un couplage des méthodes géostatistiques et de dispositifs type multilevel.

9.4.5. Intégration des contraintes de chantier

La prise en compte dans le modèle géostatistique des contraintes chantier est un élément important pour garantir autant que possible la cohérence entre la prédiction et la réalité du terrain. En effet, comme illustré par la fiche de cas de Sarcelles au paragraphe 8.3, des écarts notables entre tonnages prédits et observés sur le terrain peuvent être constatés en cas de différences entre les conditions de modélisation et celles de tri sur le terrain.

La géostatistique permet de modéliser des teneurs ponctuelles ou moyennées par maille, d'adapter la taille de la maille, etc. pour peu que l'information soit disponible à l'avance. Comment, connaissant le modèle géostatistique, optimiser les conditions d'excavation en amont du chantier de dépollution ? Comment réactualiser de manière réactive le modèle géostatistique en cas de découvertes fortuites lors du chantier ? Comment, d'un point de vue pratique, donner la possibilité à l'ingénieur travaux d'interroger le modèle géostatistique afin de l'aider dans son travail de gestion du chantier ?

A titre illustratif, des travaux de recherche en cours chez Antea Group consistent à appliquer aux simulations stochastiques du modèle géostatistique un ensemble d'opérations virtuelles de chantier (tri, zones particulières, excavation top-down, andins, remplissage des camions), afin de pouvoir anticiper l'impact de ces opérations sur les teneurs des futures bennes de camions. Des approches similaires sont déjà réalisées dans le domaine minier pour la gestion des flux de minerais dans les différents process (Marques, 2009).

10. Conclusion

Ce travail a eu pour objectif de dresser un **bilan** de quinze années d'application de la géostatistique aux sites et sols pollués. Pour mener à bien cette synthèse, l'équipe de projet s'est constituée avec un double point de vue : celui de l'expert sites et sols pollués amené à utiliser la géostatistique dans ses études et celui de l'expert géostatisticien amené à traiter des données de sites et sols pollués.

Plusieurs angles d'analyses ont été adoptés pour aboutir à ce bilan : i) état de l'art des principaux objectifs et concepts géostatistiques ainsi que les réponses qu'ils apportent aux questions métiers rencontrées en Sites et Sols Pollués, ii) analyse de la complémentarité de la géostatistique avec l'acquisition de données géophysiques ou de mesures in situ, iii) synthèse bibliographique des travaux publiés dans différents pays, iv) enquête auprès d'acteurs impliqués dans la caractérisation de sites pollués, v) analyse du contexte réglementaire dans différents pays, vi) illustration d'applications.

Au terme de ce travail, la géostatistique apparaît comme un **outil d'aide à la décision pertinent** lors du diagnostic de sites pollués. Elle permet avant tout d'améliorer la compréhension de la pollution en place, de cartographier les contaminations, d'estimer les volumes et tonnages de matériaux contaminés, de quantifier les incertitudes associées à ces volumes et d'optimiser les stratégies d'échantillonnage. L'intégration dans le modèle géostatistique de différents types d'informations sur la pollution (analyses de laboratoire de divers paramètres, mesures sur site ou bien encore mesures géophysiques), bien que possible d'un point de vue méthodologique, n'apparaît néanmoins que rarement mise en pratique.

Sa mise en œuvre requiert de plus un certain **savoir-faire**, et son utilisation pour appuyer des décisions une **compréhension minimale** de ses grands principes. Il en résulte un besoin à la fois de formation des ingénieurs en charge de ce type d'études, mais également de sensibilisation des acteurs confrontés à ces études ; la **communication** entre le géostatisticien, l'ingénieur en charge du diagnostic, le donneur d'ordre et l'autorité réglementaire, qui s'avère être un élément clé pour assurer la réussite de l'étude, ne pourra que s'en trouver améliorée. Plusieurs praticiens mentionnent en outre que l'existence d'un décalage entre les attentes placées dans l'étude géostatistique et les résultats obtenus a pu constituer une source de déception. La mise en œuvre de la géostatistique ne devant pas être systématique, un travail important a été réalisé dans ce rapport afin d'identifier les **conditions d'application** de cette méthodologie ; ces dernières devant faire l'objet d'une réflexion en amont du diagnostic. En outre, la **reconnaissance au sein des guides méthodologiques** en vigueur de la pertinence de la géostatistique et de ses conditions d'application faciliterait sa mise en œuvre et le recours à cette approche pour les donneurs d'ordre. Finalement, le besoin de **cas de démonstration** illustrant de façon concrète la valeur ajoutée de telles études reste indéniable.

Plusieurs perspectives ont été proposées à l'issue de ce travail. Mentionnons notamment l'**intégration d'informations qualitatives indirectes dans les modèles géostatistiques**, telles que des résultats géophysiques ou des informations historiques. Un travail complémentaire viserait à répondre à certaines difficultés méthodologiques subsistant à l'heure actuelle et génératrices d'incertitudes dans les modèles. Par ailleurs, l'étude du **couplage entre modèles géostatistiques de pollution et de modèles d'évaluation des risques sanitaires** reste à mener. L'objectif serait de clarifier les conditions d'intégration de la distribution spatiale d'une pollution dans les calculs de risques sanitaires, et de préciser comment les résultats qui en découlent peuvent être utilisés de manière opérationnelle et reconnue par l'administration. Il semble également utile de poursuivre une réflexion sur une meilleure adaptation des résultats de modélisation géostatistique aux contraintes des chantiers de dépollution. L'étude des apports possibles de la géostatistique à l'estimation des flux de polluants, tels que des hydrocarbures chlorés, en combinaison avec des techniques de prélèvements multiniveaux en nappe, apparaît également une voie d'approfondissement d'actualité.

11. Bibliographie

- Alary, C., & Demougeot-Renard, H. (2010). Factorial Kriging Analysis As a Tool for Explaining the Complex Spatial Distribution of Metals in Sediments. *Environmental Science & Technology*, 44(2), 593-599. doi: 10.1021/es9022305
- Andronikov, S. V., Davidson, D. A., & Spiers, R. B. (2000). Variability in contamination by heavy metals: Sampling implications. *Water Air and Soil Pollution*, 120(1-2), 29-45. doi: 10.1023/a:1005261522465
- Annan A. P. (2001) *Ground Penetrating Radar Workshop*, Notes. Sensors & Software Inc
- ASTM (2010a), *Standard Guide for Analysis of Spatial Variation in Geostatistical Site Investigations*, D5922-96 (Reapproved 2010), DOI : 10.1520/D5922-96R10.
- ASTM (2010b), *Standard Guide for Selection of Simulation Approaches in Geostatistical Site Investigations*, D5923-96 (Reapproved 2010), DOI : 10.1520/D5923-96R10.
- ASTM (2010c), *Standard Guide for Selection of Kriging Methods in Geostatistical Site Investigations*, D5923-96 (Reapproved 2010), DOI : 10.1520/D5923-96R10.
- Atteia, O. (2012). Éléments de validation de la mesure sur site avec un PID. *Environnement et technique*, 320.
- Avocat R., C. Boulanger (2007) Caractérisation des lagunes à hydrocarbures - Caractérisation des volumes et des masses hétérogènes stockées, Saunier & Associés, CGG VERITAS, RECORD n°05-0133/1A
- Bechler A., T. Romary, N. Jeannée, Y. Desnoyers (2012), Geostatistical sampling optimization of contaminated facilities, In *Proceedings of the IXth conference on geostatistics for environmental applications, geoENV*, ed. J.J. Gomez-Hernandez.
- Bengtsson, G., & Torneman, N. (2009). A Spatial Approach to Environmental Risk Assessment of PAH Contamination. *Risk Analysis*, 29(1), 48-61. doi: 10.1111/j.1539-6924.2008.01128.x
- Bing-Canar J. (2008), FIELDS Group, U.S. EPA, Region 5, Superfund n°312.886.6182, Feddeler Landfill, RAT Survey Phase I
- Boulanger C. (2011) De la bonne prescription de la géophysique, Journée ADEME Géophysique et Sols pollués, CGGVERITAS Services SA.
- Bugai, D., Kashparov, V., Dewiere, V., Khomutinin, Y., Levchuk, S., & Yoschenko, V. (2005). Characterization of subsurface geometry and radioactivity distribution in the trench containing Chernobyl clean-up wastes. *Environmental Geology*, 47(6), 869-881. doi: 10.1007/s00254-004-1218-6
- Cai, Z. S., Wilson, R. D., Cardiff, M. A., & Kitanidis, P. K. (2011). Increasing Confidence in Mass Discharge Estimates Using Geostatistical Methods. *Ground Water*, 49(2), 197-208. doi: 10.1111/j.1745-6584.2010.00709.x
- Chambers, D. (2011). The Fukushima Daiichi nuclear incident: A Summary, CSA N288 TC Meeting, SENES CONSULTANT LTD, Rapport non public.
- Chen, J. Q., Wang, Z. X., Wu, X., Zhu, J. J., & Zhou, W. B. (2011). Source and hazard identification of heavy metals in soils of Changsha based on TIN model and direct exposure method. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21(3), 642-651. doi: 10.1016/s1003-6326(11)60761-9
- Chiles, J. P., Demougeot-Renard, H., de Fouquet, C., Garcia, M., Jeannee, N., G., L. L., & Peraudin, J. J. (2005). Géostatistique appliquée aux sites et sols pollués. Manuel méthodologique et exemples d'application (pp. 139).
- Chu, H. J., Lin, Y. P., Jang, C. S., & Chang, T. K. (2010). Delineating the hazard zone of multiple soil pollutants by multivariate indicator kriging and conditioned Latin hypercube sampling. *Geoderma*, 158(3-4), 242-251. doi: 10.1016/j.geoderma.2010.05.003
- D'Or, D. (2005). *Towards a real-time multi-phase sampling strategy optimization*.

- D'Or, D., Demougeot-Renard, H., & Garcia, M. (2008). *Geostatistics for contaminated sites and soils: Some pending questions* (Vol. 15).
- D'Or, D., Demougeot-Renard, H., & Garcia, M. (2009). An Integrated Geostatistical Approach for Contaminated Site and Soil Characterisation. *Mathematical Geosciences*, 41(3), 307-322. doi: 10.1007/s11004-009-9213-9
- Dehnert, J., Leven, C., Trubitsch, R., & Weiss, H. (2010). Determination of high-resolution concentration profiles of nitrate in groundwater by means of direct push soundings. *Grundwasser*, 15(4), 221-230. doi: 10.1007/s00767-010-0150-9
- Delcausse, C., & Belbeze, S. (2003). Investigation des gaz du sol d'une ZAC (U. France, Trans.). non public.
- Demougeot-Renard, H. (2002). *De la reconnaissance à la réhabilitation des sols industriels pollués: estimations géostatistiques pour une optimisation multicritère*. PhD Sc.Nat., Ecole Polytechnique Fédérale, Zürich, Suisse. Retrieved from <http://www.vdf.ethz.ch/>
- Demougeot-Renard, H. (2002). *De la reconnaissance à la réhabilitation des sols industriels pollués: estimations géostatistiques pour une optimisation multicritère*. thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich, Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich. Retrieved from <http://www.vdf.ethz.ch/>
- Demougeot-Renard, H., & De Fouquet, C. (2004). Geostatistical approach for assessing soil volumes requiring remediation: Validation using lead-polluted soils underlying a former smelting works. *Environmental Science & Technology*, 38(19), 5120-5126. doi: 10.1021/es0351084
- Demougeot-Renard, H., de Fouquet, C., & Fritsch, M. (2004). *Optimizing sampling for acceptable accuracy levels on remediation volume and cost estimations - An iterative approach, based on geostatistical methods, illustrated on a former smelting works polluted with lead* (Vol. 13).
- Demougeot-Renard, H., de Fouquet, C., & Renard, P. (2004). Forecasting the number of soil samples required to reduce remediation cost uncertainty. *Journal of Environmental Quality*, 33(5), 1694-1702.
- Demougeot-Renard, H., Haouche-Belkessam, L., & Deny, S. (2008). Reconnaissance assistée de sites pollués par l'utilisation conjointe de mesures rapides sur site et de traitements géostatistiques. Conception et validation d'une démarche itérative de reconnaissance (rapport final REPERAGE) (pp. 116): ADEME.
- Denis A., M. Martinaud (2003). Reconnaissance géotechnique et géophysique du sol urbain. *Sols Urbain, HERMES Science, ISBN 2-7462-0753-2*
- Desnoyers, Y. (2010). *Approche méthodologique pour la caractérisation géostatistique des contaminations radiologiques dans les installations nucléaires*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Desnoyers, Y., Chiles, J. P., Dubot, D., Jeannee, N., & Idasiak, J. M. (2011). Geostatistics for radiological evaluation: study of structuring of extreme values. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25(8), 1031-1037. doi: 10.1007/s00477-011-0484-6
- Dhainaut E. (2011), Bilan sur l'utilisation de l'analyseur de métaux in-situ NITON (modèle XL2) projet Antea Group n°PCHP100060, Document non public.
- Dondaine E., C. Delcausse (2003). Recherche de cuves enterrées, Villetaneuse, Rapport non public URS France n°52272-001-412
- Dondaine E., S. Belbeze (2004). Campagne géophysique, Gif-sur-Yvette, Rapport non public, URS France n°54158-001-412

- Dumont F. (2009), Fluorescence X portable, Avantages et Applications, FONDIS ELECTRONIC, Conférence CETAMA Tours 2009
- Durno M. (2008), Recommended Management Practice based on the Removal Action at the Warren Recyclin/Warren Hills landfill site, *Emergency Response branch*, US EPA Region 5.
- Emery, X. (2006). A disjunctive kriging program for assessing point-support conditional distributions. *Computers & Geosciences*, 32(7), 965-983. doi: 10.1016/j.cageo.2005.10.011
- Emery, X. (2007). On some consistency conditions for geostatistical change-of-support models. *Mathematical Geology*, 39(2), 205-223. doi: 10.1007/s11004-006-9073-5
- EOST (2006) Cartographie géomagnétique, Synthèse des études du site Bostik de Ribécourt (60), projet Antea, rapport non public
- Farahmand, A. R., Manshouri, M., Liaghat, A., & Sedghi, H. (2010). Comparison of kriging, ANN and ANFIS models for spatial and temporal distribution modeling of groundwater contaminants. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 8(3-4), 1146-1155.
- Faucheux C., N. Jeannée (2012), Industrial experience feedback of a geostatistical estimation of contaminated soil volumes, In *Proceedings of the IXth conference on geostatistics for environmental applications, geoENV*, ed. J.J. Gomez-Hernandez.
- Fiacco J. (2009), Using Triad at Multiple Sites to Enhance Data Representativeness, ERM presentation at USEPA
- Garcia, M., & Froidevaux, R. (1996). *Application of geostatistics to 3D modelling of contaminated sites: a case study*. Paper presented at the geoENV I, Lisbon (P).
- Gay, J. R., & Korre, A. (2006). A spatially-evaluated methodology for assessing risk to a population from contaminated land. *Environmental Pollution*, 142(2), 227-234. doi: 10.1016/j.envpol.2005.10.035
- Gay, J. R., & Korre, A. (2009). Accounting for pH heterogeneity and variability in modelling human health risks from cadmium in contaminated land. *Science of the Total Environment*, 407(14), 4231-4237. doi: 10.1016/j.scitotenv.2009.03.021
- GEOSIPOL (2012), Etudes de démonstration de l'intérêt de la géostatistique dans le domaine des sites et sols pollués. Rapport ADEME.
- Geovariances (2011), Kartotrak User's Guide, version 1, 226p.
- Glavin, R. J., & Hooda, P. S. (2005). A practical examination of the use of geostatistics in the remediation of a site with a complex metal contamination history. *Soil & Sediment Contamination*, 14(2), 155-169. doi: 10.1080/1532.380590911814
- Goodman D. (2008) GPR-SLICE, Ground Penetrating radar Imaging Software, Users manual.
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation*: Oxford university press.
- Goovaerts, P. (2010). Geostatistical software. In M. M. F. A. Gatis (Ed.), *Handbook of applied analysis. Software tools, methods and application* (Vol. 1, pp. 129-138). Berlin: Springer.
- Goovaerts, P., & Van Meirvenne, M. (2001). *Delineation of hazardous areas and additional sampling strategy in presence of a location-specific threshold* (Vol. 11).
- Gourry JC. (2007). Etude méthodologique de détection des produits organochlorés (POC) sur site pollué par méthodes géophysiques et analyse de gaz, BRGM, RECORD n° 05-0512/1A
- Guastaldi, E., & Del Frate, A. A. (2012). Risk analysis for remediation of contaminated sites: the geostatistical approach. *Environmental Earth Sciences*, 65(3), 897-916. doi: 10.1007/s12665-011-1133-6

- Guérin R., Panissod C., Thiry M., Benderitter Y., Tabbagh A., Huet-Taillanter S. (2002), La friche industrielle de Mortagne-du-Nord (59) - III - Approche méthodologique d'étude géophysique non-destructive des sites pollués par des eaux fortement minéralisées. *Bull. Soc. géol. France*, 173/5, p. 471-477.
- Guyonnet, D., Bourgine, B., Dubois, D., Fargier, H., Come, B., & Chiles, J. P. (2003). Hybrid approach for addressing uncertainty in risk assessments. *Journal of Environmental Engineering-Asce*, 129(1), 68-78. doi: 10.1061/(asce)0733-9372(2003)129:1(68)
- Guyonnet, D., Dubois, D., Bourgine, B., Fargier, H., Côme, B., & Chilès, J. P. (2003). Prise en compte de l'incertitude dans l'évaluation du risque d'exposition aux polluants du sol. *Étude et Gestion des Sols*, 10(4), 357-368.
- Hansen R.O. (1993), Interpretative gridding by anisotropic kriging: *Geophysics*, 58, 1491–1497.
- Hengl, T. (2007). Hands-on software. In E. Communities (Ed.), *A practical guide to geostatistical mapping of environmental variables* (Vol. 1, pp. 53-81). Luxembourg: European Communities.
- Hiez D. (2011), UPDS - Intérêts de la géophysique pour les études et travaux sur sites pollués. *UPDS, Acte des journées Géophysique et sols pollués, maison de la chimie, ADEME*
- Hosseini, A. H., Deutsch, C. V., Biggar, K. W., & Mendoza, C. A. (2010). Probabilistic data integration for characterization of spatial distribution of residual LNAPL. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 24(5), 735-749. doi: 10.1007/s00477-009-0360-9
- Hubé, D. (2008). *Pourquoi investiguer ? Enjeux techniques et enjeux financiers des diagnostics*. Paper presented at the 3ème Journée Technique d'information et de retour d'expérience de la gestion des sols pollués « Les diagnostics : Objectifs, enjeux et moyens », Paris.
- IRSN. (2011). *Gestion des sites pollués par des substances radioactives: guide méthodologique*.
- Jeanne, N. (2001). *Caractérisation géostatistique de pollutions industrielles de sols: cas des hydrocarbures aromatiques polycycliques sur d'anciens sites de cokeries*. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris.
- Jeanne, N., & de Fouquet, C. (2003). Contribution of auxiliary information for the estimation of grades in heterogeneous media: example in soil pollution. *Comptes Rendus Geoscience*, 335(5), 441-449. doi: 10.1016/s1631-0713(03)00083-x
- Joint Ore Reserves Committee of The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, A. I. o. G. a. M. C. o. A. (2004). *Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves (The JORC Code)*.
- Juang, K. W., Lee, D. Y., & Ellsworth, T. R. (2001). Using rank-order geostatistics for spatial interpolation of highly skewed data in a heavy-metal contaminated site. *Journal of Environmental Quality*, 30(3), 894-903.
- Juang, K. W., Lee, D. Y., & Teng, Y. L. (2005). Adaptive sampling based on the cumulative distribution function of order statistics to delineate heavy-metal contaminated soils using kriging. *Environmental Pollution*, 138(2), 268-277. doi: 10.1016/j.envpol.2005.04.003
- Kishne, A. S., Bringmark, E., Bringmark, L., & Alriksson, A. (2003). Comparison of ordinary and lognormal kriging on skewed data of total cadmium in forest soils of Sweden. *Environmental Monitoring and Assessment*, 84(3), 243-263. doi: 10.1023/a:1023326314184
- Laperche, V., & Mossman, J. R. (2004). *Protocole d'échantillonnage des sols urbains pollués par du plomb*. BRGM.

- Li, K. B., Goovaerts, P., & Abriola, L. M. (2007). A geostatistical approach for quantification of contaminant mass discharge uncertainty using multilevel sampler measurements. *Water Resources Research*, 43(6). doi: 10.1029/2006wr005427
- Lin, Y. P., Chang, T. K., Shih, C. W., & Tseng, C. H. (2002). Factorial and indicator kriging methods using a geographic information system to delineate spatial variation and pollution sources of soil heavy metals. *Environmental Geology*, 42(8), 900-909. doi: 10.1007/s00254-002-0600-5
- Kuosamen V. (2002), Dust and Seepage Contamination presentation, 2nd Mineo Workshop, Geologian Tutkimuskeskus (GTK), Geological Survey of Finland.
- Mac Donald S., T. Halihan (2003). Innovative High Resolution Electrical Resistivity Imaging (ERI), AestusLLC, EPA Triad Conference – Amherst, Massachusetts June 12, 2008
- Magneron C., N. Jeannée, O. Le Moine, JF. Bourillet (2008), Integrating prior knowledge and locally varying model parameters with M-GeoStatistics: methodology and application to bathymetry mapping In *geoENV VII - Geostatistics for Environmental Applications*, eds. Renard, Demougeot-Renard & Froidevaux, Kluwer Academic Publishers, pp. 161-172.
- Maji, R., Sudicky, E. A., Panday, S., & Teutsch, G. (2006). Transition probability/Markov chain analyses of DNAPL source zones and plumes. *Ground Water*, 44(6), 853-863. doi: 10.1111/j.1745-6584.2005.00194.x
- Marchant, B. P., Saby, N. P. A., Jolivet, C. C., Arrouays, D., & Lark, R. M. (2011). Spatial prediction of soil properties with copulas. *Geoderma*, 162(3-4), 327-334. doi: 10.1016/j.geoderma.2011.03.005
- Marchant, B. P., Tye, A. M., & Rawlins, B. G. (2011). The assessment of point-source and diffuse soil metal pollution using robust geostatistical methods: a case study in Swansea (Wales, UK). *European Journal of Soil Science*, 62(3), 346-358. doi: 10.1111/j.1365-2389.2011.01373.x
- Mari J.L., G. Arens, D. Chapellier, P. Gaudiani (1998), Géophysique de gisement et de génie civil. *Editions technip*, ISBN 2-7108-0727-0
- Marques D.M., D.M., J.F.C.L. Costa, D.T. Ribeiro, J.C. Koppe (2009) The evidence of volume variance relationship in blending and homogenization piles using stochastic simulations, In *Fourth World Conference on Sampling & Blending*, Southern African Institute of Mining and Metallurgy.
- Maxwell, R. M., Carle, S. F., & Tompson, A. F. B. (2008). Contamination, risk, and heterogeneity: on the effectiveness of aquifer remediation. *Environmental Geology*, 54(8), 1771-1786. doi: 10.1007/s00254-007-0955-8
- MINEO (2002) Assessing and monitoring the environmental impact of mining in Europe using advanced Earth Observation techniques, 2nd MINEO workshop, Hyperspectral imaging and GIS in mining-related impact mapping and monitoring, Orléans, France, 11-13 December 200
- Milsom J. D. (2003) *Field Geophysics*, 3rd Edition, WILEY&SONS, ISBN 0-7470-84347-0
- Minkkinen P. (2003) Applications of Sampling for Theory, Lappeenranta University of Technology, WSC2, Barnaul.
- Mouser, P. J., Rizzo, D. M., Roling, W. F. M., & Van Breukelen, B. M. (2005). A multivariate statistical approach to spatial representation of groundwater contamination using hydrochemistry and microbial community profiles. *Environmental Science & Technology*, 39(19), 7551-7559. doi: 10.1021/es0502627
- Munsch M. (2011) Imagerie magnétique d'objets anthropiques enfouis dans le sol : fûts, bombes et obus non explosés : des cas concrets en France

- Myers, J. C. (1997). *Geostatistical error management. Quantifyin uncertainty for environmental sampling and mapping*. Hoboken: John Wiley and sons.
- Nagourney S. J. (2008), Triad: why isn't it used more?, NJDEP Office of Quality Assurance, New Jersey, USEPA .
- NARM (2008) National Association of Remedial Project Managers, The Rapid Assessment Tools, RAT, 18th Annual training Conference
- Pantazidou, M., & Liu, K. (2008). DNAPL distribution in the source zone: Effect of soil structure and uncertainty reduction with increased sampling density. *Journal of Contaminant Hydrology*, 96(1-4), 169-186. doi: 10.1016/j.jconhyd.2007.11.002
- Paul, R., & Cressie, N. (2011). Lognormal block kriging for contaminated soil. *European Journal of Soil Science*, 62(3), 337-345. doi: 10.1111/j.1365-2389.2011.01371.x
- Quental L. (2002), Geostatistical modelling using field data and hyperspectral images 2nd MINEO Workshop - Orléans, 11-13 December 2002
- Rathbun, S. L. (2006). Spatial prediction with left-censored observations. *Journal of Agricultural Biological and Environmental Statistics*, 11(3), 317-336. doi: 10.1198/108571106x128776
- Renaud JC, (2008). Mission de repérage géophysique sur plateforme in et off-shore, Laser Renaud SA, Angola, Rapport non public.
- Rivoirard J., Demange C., Freulon X., Lécureuil A., Bellot N. (2012) A top-cut model for deposits with very skewed grade distribution, submitted to Mathematical Geosciences.
- Rivoirard J. (2002) Analyse de la sensibilité à l'écrêtage à une coupure haute dans l'évaluation de l'or récupérable. Rapport interne, Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris, 25 p. Confidentiel.
- Roth, C. (1998). Is lognormal kriging suitable for local estimation? *Mathematical Geology*, 30(8), 999-1009. doi: 10.1023/a:1021733609645
- Saito, H., & Goovaerts, P. (2000). Geostatistical interpolation of positively skewed and censored data in a dioxin-contaminated site. *Environmental Science & Technology*, 34(19), 4228-4235. doi: 10.1021/es991450y
- Saito, H., & Goovaerts, P. (2001). Accounting for source location and transport direction into geostatistical prediction of contaminants. *Environmental Science & Technology*, 35(24), 4823-4829. doi: 10.1021/es010580f
- Saito, H., McKenna, S. A., & Goovaerts, P. (2005). Accounting for geophysical information in geostatistical characterization of unexploded ordnance (UXO) sites. *Environmental and Ecological Statistics*, 12(1), 7-25. doi: 10.1007/s10651-005-6815-3
- Samuel-Rosa, A., Dalmolin, R. S. D., & Pedron, F. D. (2011). Characterization of soil covers in closed landfill sites with (geo)statistical tools. *Engenharia Sanitaria E Ambiental*, 16(2), 121-126.
- Schnabel, U., & Tietje, O. (2003). Explorative data analysis of heavy metal contaminated soil using multidimensional spatial regression. *Environmental Geology*, 44(8), 893-904. doi: 10.1007/s00254-003-0844-8
- Schwede, R. L., & Cirpka, O. A. (2010). Stochastic evaluation of mass discharge from pointlike concentration measurements. *Journal of Contaminant Hydrology*, 111(1-4), 36-47. doi: 10.1016/j.jconhyd.2009.10.011
- Singh, A. K., & Ananda, M. M. A. (2002). Rank kriging for characterization of mercury contamination at the East Fork Poplar Creek, Oak Ridge, Tennessee. *Environmetrics*, 13(5-6), 679-691. doi: 10.1002/env.537
- Sleboda Braun J. (2005), Jacobsville, IN Continued Superfund Site Assessment for lead in Soil, US EPA Region 5

- Thayer, W. C., Griffith, D. A., Goodrum, P. E., Diamond, G. L., & Hassett, J. M. (2003). Application of geostatistics to risk assessment. *Risk Analysis*, 23(5), 945-960. doi: 10.1111/1539-6924.00372
- Vaccaro, S., Sobiecka, E., Contini, S., Locoro, G., Free, G., & Gawlik, B. M. (2007). The application of positive matrix factorization in the analysis, characterisation and detection of contaminated soils. *Chemosphere*, 69(7), 1055-1063. doi: 10.1016/j.chemosphere.2007.04.032
- Van Groenigen, J. W., Siderius, W., & Stein, A. (1999). Constrained optimisation of soil sampling for minimisation of the kriging variance. *Geoderma*, 87(3-4), 239-259. doi: 10.1016/s0016-7061(98)00056-1
- Van Meirvenne, M., & Goovaerts, P. (2001). Evaluating the probability of exceeding a site-specific soil cadmium contamination threshold. *Geoderma*, 102(1-2), 75-100. doi: 10.1016/s0016-7061(00)00105-1
- Verstraete, S., & Van Meirvenne, M. (2008). A multi-stage sampling strategy for the delineation of soil pollution in a contaminated brownfield. *Environmental Pollution*, 154(2), 184-191. doi: 10.1016/j.envpol.2007.10.014
- Wang, T. A., & McTernan, W. F. (2002). The development and application of a multilevel decision analysis model for the remediation of contaminated groundwater under uncertainty. *Journal of Environmental Management*, 64(3), 221-235. doi: 10.1006/jema.2001.0470
- Woldt W.E., M. E.Hagenmeister, D. D.Jones (1998).Characterisation of an unregulated landfill using Surface-Based Geophysics, US geological Survey 104 program, GroundWater journal, Vol 36, N°6, November-December.
- Wu, J., Norvell, W. A., & Welch, R. M. (2006). Kriging on highly skewed data for DTPA-extractable soil Zn with auxiliary information for pH and organic carbon. *Geoderma*, 134(1-2), 187-199. doi: 10.1016/j.geoderma.2005.11.002
- Yamamoto, J. K. (2007). On unbiased backtransform of lognormal kriging estimates. *Computational Geosciences*, 11(3), 219-234. doi: 10.1007/s10596-007-9046-x
- Zhang, K. J., Li, H., & Achari, G. (2009). Fuzzy-stochastic characterization of site uncertainty and variability in groundwater flow and contaminant transport through a heterogeneous aquifer. *Journal of Contaminant Hydrology*, 106(1-2), 73-82. doi: 10.1016/j.jconhyd.2009.01.003

Annexe A : Questionnaires envoyés aux professionnels

Les pages suivantes présentent le questionnaire envoyé aux professionnels. Deux formats de questionnaires ont été envoyés :

- Un formulaire complet, à la fois en français et en anglais, sur base d'une centaine de contacts de l'équipe projets ;
- Un questionnaire allégé, en anglais, distribué au sein du réseau NICOLE et du Common Forum.

Le tableau de la page suivante présente la liste des personnes ayant répondu à l'enquête.

Tableau 17 : Liste des personnes ayant répondu au questionnaire envoyé aux professionnels.

Nom	Fonction	Organisme	Pays
Bruno Fricaudet	Gérant	BFR EX POLL	France
Pierre Delcour	Chargé d'études pollutions des sols, déchets	CETE Nord-Picardie	France
Loïc Constantin	Chef de la section sites pollués du canton de Fribourg	SEN Fribourg	Suisse
Olivier Bour	Ingénieur à l'unité Comportement des contaminants dans les sols et matériaux	INERIS	France
Nicolas Barret /Benoît Paris	Chef de projet / Directeur	INTERA	France
Jean-Marc Lavanchy	Chef du département « Protection des eaux souterraines et entreposage/Stockage »	AF-Consult	Suisse
Antoine Indaco	Responsable sites pollués Lausanne	CSD	Suisse
Pascale Ducommun	Ingénieure de projet - hydrogéologue	BG Ingénieurs conseils	Suisse
Pól O'Seasain	Inspector	Environmental Protection Agency	Ireland
Thierry Gisbert	Environment Business Practice Manager	ARCADIS	France
Eddy Van Dyck	Head of Department on Soil management	OVAM (Public Waste Agency of Flanders)	Belgique
Vladimir Elias	Geochemist	YBYTY Consultoria	Brésil
André Paquet	Ingénieur	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP)	Québec
Birgitta Beuthe	Associate Manager	SPAQuE	Belgique
Jean-Marie Côme / Sébastien Kaskassian	Directeur de projets, direction R&D	BURGEAP	France
Christophe Debayle	Chef du laboratoire de surveillance atmosphérique et d'alerte (LS2A)	IRSN	France
Philippe Pouget-Abadie	Directeur Activité Investigation & Réhabilitation France	URS FRANCE	France
François Garçin	Responsable Développement Modélisation et data management	ARCADIS	France
Patrick de Moura	Chef de projet	CEA Fontenay-aux-Roses	France
Guillaume Gendreau	Chef de projet	SOCOTEC	France
Gaël Plassart	Co-gérant	NEODYME ENVISOL	France
Daniel Seisson	Chef de projet	CEA	France
Simon Garzaniti	Attaché	ISSEP	Belgique
Eric Di Gioia	Chef de projets, fondé de pouvoir	CSD Ingénieurs SA	Suisse
Christel Vautier	Chef de projet	TOTAL MS /HSE/ Environnement & Réhabilitation des Sites	France
Stéphane Belbeze	Directeur de projet	Antea Group	France



Retour d'expérience sur l'utilisation de la géostatistique pour la caractérisation de sites pollués par des substances chimiques ou radioactives - Questionnaire -

RECORD¹⁴, réseau de recherche coopératif sur les déchets et l'environnement composé de membres industriels et institutionnels, a lancé en 2011-2012 une étude pour un « **retour d'expérience critique sur l'utilisation de méthodes géostatistiques pour la caractérisation des sites et sols pollués** ». Une enquête est menée dans ce cadre en France et à l'étranger auprès d'un ensemble de bureaux d'études, industriels détenteurs de sites et organismes publics. Le présent questionnaire est destiné à recueillir **votre perception** en tant qu'acteur du domaine des sites pollués, sur **l'utilisation concrète de la géostatistique** lors des étapes de diagnostic (investigation), dépollution (assainissement) ou contrôle après travaux. Que cette perception soit négative ou positive, votre réponse est essentielle pour que la synthèse soit la plus représentative possible de l'état actuel d'utilisation de cet outil.

Nous vous remercions à l'avance pour le temps que vous consacrerez à remplir ce questionnaire (20-30 minutes maximum). Si vous le jugez plus facile, le remplissage du questionnaire peut également être réalisé par nos soins lors d'une brève discussion téléphonique couvrant les différentes questions.

Afin de vous remercier de votre contribution, nous aurons le plaisir de vous transmettre une synthèse des réponses à l'issue de l'enquête.

Coordonnées

Organisme : _____

Nom, prénom : _____ Fonction : _____

Adresse : _____

Téléphone : _____ Mail : _____

Quel(s) rôle(s) votre organisme joue-t-il dans le domaine des sites et sols pollués :

- Donneur d'ordre
- Elaboration de normes, réglementations, guides méthodologiques
- Prescription, évaluation et contrôle des études et mesures prises sur sites pollués
- Réalisation d'études, missions de conseils et expertises
- Réalisation de travaux de dépollution (assainissement, réhabilitation)
- Recherche et/ou formation
- Autre ou précisions : _____

Contexte d'utilisation de la géostatistique

Quelle est (quelles sont) l'(les) utilisation(s) de la géostatistique par votre organisme :

- Commande d'études géostatistiques
- Réalisation d'études géostatistiques à l'aide de compétences internes
- Sous-traitance à d'autres sociétés ou consultants spécialisés dans ce domaine

¹⁴ <http://www.record-net.org/>

- Confrontation (évaluation, expertise,...) à des études mettant en œuvre la géostatistique
- Aucune utilisation ni confrontation à la géostatistique
- Autre : _____

Sur combien de cas l'avez-vous appliquée ou vue appliquée au cours des cinq à dix dernières années :

- 0 1 à 5 6 à 10 >10

Retour d'expérience sur les études géostatistiques déjà menées

Sur la base des études géostatistiques auxquelles votre organisme a été confronté, quel **bilan global** tirez-vous de l'utilisation de cet outil :

- Un échec complet
- Plutôt un échec
- Un bilan mitigé
- Plutôt un succès
- Un succès complet
- Autre : _____

Quelles sont selon vous les raisons ayant conduit à ce bilan :

En cas d'échec, quelle approche alternative a été mise en œuvre ? Avec quel succès ? :

Avis de synthèse et perspectives

De manière générale pour le domaine des sites pollués, qu'identifiez-vous comme frein(s) à une utilisation plus courante de la géostatistique (Les facteurs suivants peuvent être classés par ordre d'importance, 1 désignant le facteur jugé le plus déterminant) :

- Cadre réglementaire
- Surcoût engendré par une étude géostatistique
- Délais supplémentaires engendrés par une étude géostatistique
- Nombre de données disponibles par site souvent insuffisant
- Caractéristiques des sites ou des données inadaptées à un traitement géostatistique
- Difficultés de compréhension et/ou coordination entre géostatisticiens et équipe de terrain
- Difficultés à comprendre la méthodologie et ses intérêts
- Difficultés à faire comprendre (aux décideurs, autorités, ...) la méthodologie et ses intérêts

Difficultés à trouver des géostatisticiens à même de réaliser ces travaux

Autre ou précisions : _____

Voyez-vous des **améliorations** ou avez-vous des **suggestions** pour rendre l'application de la géostatistique aux sites pollués plus aisée ?

Quelle utilisation de la géostatistique est envisagée par votre organisme dans les prochaines années ?

Autres commentaires :

Indépendamment de la mise en œuvre de la géostatistique, comment abordez-vous la problématique des **incertitudes associées aux résultats analytiques**, fréquemment élevées dans le cas d'analyse de polluants métalliques éluables (lixiviation et percolation) ou extractibles (BTEX, PCB, HAP, COHV) :

Elles sont ignorées

Elles sont appréciées grâce à la réalisation de plusieurs duplicats

Elles sont prises en compte dans l'évaluation de la compatibilité des terres grâce à un avis d'expert

Elles sont prises en compte dans l'évaluation de la compatibilité des terres via une approche statistique / géostatistique

Autre :

Les fiches sites présentées en deux exemplaires aux pages suivantes visent à recueillir de façon plus précise votre retour d'expérience concernant la mise en œuvre de la géostatistique sur des sites particuliers. Merci de renvoyer le questionnaire complété à l'adresse suivante : jeannee@geovariances.com.

Fiche site 1

Brève présentation du site

- Contexte (risque enviro., cession immobilière...) : _____
- Pollution(s) : _____
- Milieux atteints : _____
- Activités sur le site : _____
- Superficie du site : _____
- Enjeux particuliers : _____

Objectifs de l'étude géostatistique

Quels étaient les objectifs de l'application de la géostatistique à ce site :

- Optimisation de stratégies d'échantillonnage
- Levée de doute / Validation de l'existence d'un risque potentiel sur le site
- Cartographie de la pollution en place,
- Calcul de volumes pollués ou de masses de polluants en place
- Évaluation de la compatibilité des terres avec les usages futurs envisagés lors de la réhabilitation (ex. cartes de probabilité de dépassement de seuil)
- Orientation des matériaux excavés vers différentes filières de traitement/valorisation/mise en décharge
- Autre _____

La géostatistique a-t-elle répondu aux objectifs fixés ?

Informations secondaires

Avez-vous eu recours à des informations secondaires sur ce site ?

- Oui
 - Mesures sur site du type (diagraphies MIP, XRF, PID...) : _____
 - Géophysique (méthode ?) : _____

Comment avez-vous couplé ou intégré ces informations à l'analyse géostatistique ?

- Non, car : _____

Analyse critique

Quelle a été la plus-value de la géostatistique pour la caractérisation du site pollué ?

Quels ont été les problèmes et difficultés rencontrés ?

- Liés aux données
- Liés à la méthodologie géostatistique
- Liés au site (taille, échantillonnage, ...)

Autres ou précisions : _____

Autre(s) commentaire(s)

Ce site peut-il faire l'objet d'une synthèse / communication dans le cadre du projet RECORD, moyennant validation par vos soins des informations transmises : Oui Non

Fiche site 2

Brève présentation du site

- Contexte (risque enviro., cession immobilière...) : _____
- Pollution(s) : _____
- Milieux atteints : _____
- Activités sur le site : _____
- Superficie du site : _____
- Enjeux particuliers : _____

Objectifs de l'étude géostatistique

Quels étaient les objectifs de l'application de la géostatistique à ce site :

- Optimisation de stratégies d'échantillonnage
- Levée de doute / Validation de l'existence d'un risque potentiel sur le site
- Cartographie de la pollution en place,
- Calcul de volumes pollués ou de masses de polluants en place
- Évaluation de la compatibilité des terres avec les usages futurs envisagés lors de la réhabilitation (ex. cartes de probabilité de dépassement de seuil)
- Orientation des matériaux excavés vers différentes filières de traitement/valorisation/mise en décharge
- Autre _____

La géostatistique a-t-elle répondu aux objectifs fixés ?

Informations secondaires

Avez-vous eu recours à des informations secondaires sur ce site ?

- Oui
 - Mesures sur site du type (diagraphies MIP, XRF, PID...) : _____
 - Géophysique (méthode ?) : _____

Comment avez-vous couplé ou intégré ces informations à l'analyse géostatistique ?

- Non, car : _____

Analyse critique

Quelle a été la plus-value de la géostatistique pour la caractérisation du site pollué ?

Quels ont été les problèmes et difficultés rencontrés ?

- Liés aux données
- Liés à la méthodologie géostatistique
- Liés au site (taille, échantillonnage, ...)

Autres ou précisions : _____

Autre(s) commentaire(s)

Ce site peut-il faire l'objet d'une synthèse / communication dans le cadre du projet RECORD, moyennant validation par vos soins des informations transmises : Oui Non



Feedback about the use of geostatistics for contaminated site characterization (chemical or radioactive hazardous substances) - Survey -

RECORD¹⁵ is a cooperative research network on waste and environment composed of industrial and institutional members. In 2011-2012, the network has launched a study for **“a critical feedback on the use of geostatistics for site characterization, polluted either with chemical or radioactive substances”**. A survey is conducted in this framework in France and abroad among consulting offices, polluted sites owners and public environmental agencies. As an actor of the topic, the purpose of this survey is to collect your **feeling** about **the practical use of geostatistics** at the different steps of site management (investigation, risk assessment, site remediation, evaluation of remediation performance). Whether your feeling is positive or negative, your answer is fundamental for an objective survey that reflects the current use of these methods.

We sincerely thank you in advance for the time you will spend to complete this questionnaire (20-30 minutes maximum). If it seems easier to you, we can also fill in the questionnaire for you during a short phone talk.

We will also be pleased to send you a synthesis of the answers collected from the survey.

Thanks for sending back the filled questionnaire by email to: jeannee@geovariances.com.

General information

Organization: _____

Last name, first name: _____ Position: _____

Address: _____

Phone number: _____ E-mail: _____

Which role(s) play(s) your organization in the polluted sites domain:

- Polluted sites owner
- Development of regulations, guidelines, methodological guides
- Prescription, assessment and control quality of investigation studies and remediation actions
- Risk assessment, characterization, monitoring, consultancy, expertise
- Soil and water remediation, engineering, technologies
- Research & teaching
- Other or details: _____

Context of using geostatistics

What is(are) the use(s) of geostatistics done by your organization:

- Contract geostatistical studies
- Perform geostatistical studies using internal experts
- Subcontract to companies or consultants specialized on that topic
- Confronted (audit, expertise,...) with studies including geostatistics
- No use of geostatistics

¹⁵ <http://www.record-net.org/>

Other: _____

On how many cases did you apply or did you see it applied during the last five to ten years:

0

1 to 5

6 to 10

>10

Feedback on already done geostatistical studies

Using the experience of your organization on geostatistical methods, which overall conclusions do you draw about their:

A full failure

Rather a failure

Mixed results

Rather a success

A full success

Other : _____

According to you, which are the reasons that led to this result:

In case of failure, which alternative approach was used? With which success?

Synthesis and perspectives

In the domain of contaminated sites in general, what do you think is hampering a more frequent use of geostatistics (The following factors can be ranked, 1 defining the most important factor):

Regulatory framework

Additional costs induced by a geostatistical study

Supplementary time required for a geostatistical study

Not enough available data on the contaminated site

Geostatistical tools not adapted to polluted site and data features

Difficulties to understand and coordinate the geostatisticians and the field experts

Difficulties to understand the geostatistical method and its added value

Difficulties to make understandable the geostatistical methodology and its interests to the

different stakeholders (site owners, authorities, ...)

Difficulties to find geostatisticians for performing the studies

Other or details: _____

Do you see **improvements** or do you have **suggestions** to make easier the application of geostatistics to polluted sites?

Which use of geostatistics is planned in your organization in the next years?

Other comments:

Apart from the use of geostatistics, how do you manage the issue of **uncertainties related to analytical results**, which are often high in the case of elutable (leaching or percolation) metallic pollutants or extractable organic pollutants (BTEX, PCB, PAH, VOC):

They are ignored

They are estimated thanks to several duplicates

They are taken into account in the evaluation of soil compatibility thanks to an expert judgment

They are taken into account in the evaluation of soil compatibility thanks to an expert judgment *via* a statistical / geostatistical approach

Other:

The form presented in two copies in the following pages aims at collecting more precisely your feedback about the use of geostatistics on specific case studies.

Site 1 form

Short site introduction

- Context (environmental risk, real estate transfer...): _____
- Pollution(s): _____
- Affected environment: _____
- Site activities: _____
- Site area: _____
- Particular issues: _____

Purposes of the geostatistical study

What were the objectives of the geostatistical study for this site:

- Sampling plan optimization
- Doubt removal / Validation of the existence of a potential risk on the site
- Mapping of in place contamination
- Computation of in place contaminated volumes or masses
- Assessment of soils compatibility with future land use planned during remediation (ex. Probability maps of exceeding thresholds)
- Sorting of excavated soils into different waste management structures (treatment/valorization/dump)
- Other _____

Did geostatistics fulfill these objectives?

Auxiliary information

Did you use auxiliary information on this site?

- Yes
 - On-site measurements (MIP logs, XRF, PID...): _____
 - Geophysics (method?) : _____

How did you take this information into account for the geostatistical study?

- No, because: _____

Critical feedback

What was the benefit of geostatistics for the site characterization?

Which problems or difficulties did you encounter?

- Related to data
- Related to geostatistical methodology
- Related to the site (size, sampling, ...)

Other or details: _____

Other comment(s)

Can this site be part of a synthesis/communication in the framework of RECORD, provided that you validate the transmitted information: Yes No

Site 2 form

Short site introduction

- Context (environmental risk, real estate transfer...): _____
- Pollution(s): _____
- Affected environment: _____
- Site activities: _____
- Site area: _____
- Particular issues: _____

Purposes of the geostatistical study

What were the objectives of the geostatistical study for this site:

- Sampling plan optimization
- Doubt removal / Validation of the existence of a potential risk on the site
- Mapping of in place contamination
- Computation of in place contaminated volumes or masses
- Assessment of soils compatibility with future land use planned during remediation (ex. Probability maps of exceeding thresholds)
- Sorting of excavated soils into different waste management structures (treatment/valorization/dump)
- Other _____

Did geostatistics fulfill these objectives?

Auxiliary information

Did you use auxiliary information on this site?

- Yes
 - On-site measurements (MIP logs, XRF, PID...): _____
 - Geophysics (method?) : _____

How did you take this information into account for the geostatistical study?

- No, because: _____

Critical feedback

What was the benefit of geostatistics for the site characterization?

Which problems or difficulties did you encounter?

- Related to data
- Related to geostatistical methodology
- Related to the site (size, sampling, ...)

Other or details: _____

Other comment(s)

Can this site be part of a synthesis/communication in the framework of RECORD, provided that you validate the transmitted information: Yes No



Feedback about the use of geostatistics for contaminated site characterization (chemical or radioactive hazardous substances) - Light questionnaire -

RECORD¹⁶ is a French cooperative research network on waste and environment composed of industrial and institutional members. In 2011-2012, the network has launched a study for “**a critical feedback on the use of geostatistics for site characterization, polluted either with chemical or radioactive substances**”. A survey is conducted in this framework in France and abroad among consulting offices, polluted sites owners and public environmental agencies. As an actor of the topic, the purpose of this survey is to collect your **feeling** about **the practical use of geostatistics** at the different steps of site management (investigation, risk assessment, site remediation, evaluation of remediation performance). Whether your feeling is positive or negative, your answer is fundamental for an objective survey that reflects the current use of these methods.

We sincerely thank you in advance for the time you will spend to complete this questionnaire (5-10 minutes maximum). We will be pleased to send you a synthesis of the collected answers.

General information

Organization: _____

Last name, first name: _____ Position: _____

Address: _____

Phone number: _____ E-mail: _____

Which role(s) play(s) your organization in the polluted sites domain:

- Polluted sites owner
- Development of regulations, guidelines, methodological guides
- Prescription, assessment and control quality of investigation studies and remediation actions
- Risk assessment, characterization, monitoring, consultancy, expertise
- Soil and water remediation, engineering, technologies
- Research & teaching
- Other or details: _____

Context of using geostatistics

What is(are) the use(s) of geostatistics done by your organization:

- Contract geostatistical studies
- Perform geostatistical studies using internal experts
- Subcontract to companies or consultants specialized on that topic
- Confronted (audit, expertise,...) with studies including geostatistics
- No use of geostatistics
- Other: _____

On how many cases did you apply or did you see it applied during the last five to ten years:

- 0 1 to 5 6 to 10 >10

¹⁶ <http://www.record-net.org/>

Feedback on already done geostatistical studies

Using the experience of your organization on geostatistical methods, which overall conclusions do you draw about their:

- A full failure
- Rather a failure
- Mixed results
- Rather a success
- A full success
- Other : _____

According to you, which are the reasons that led to this result:

In case of failure, which alternative approach was used? With which success?

Synthesis and perspectives

In the domain of contaminated sites in general, what do you think is hampering a more frequent use of geostatistics (The following factors can be ranked, 1 defining the most important factor):

- Regulatory framework
- Additional costs induced by a geostatistical study
- Supplementary time required for a geostatistical study
- Not enough available data on the contaminated site
- Geostatistical tools not adapted to polluted site and data features
- Difficulties to understand and coordinate the geostatisticians and the field experts
- Difficulties to understand the geostatistical method and its added value
- Difficulties to make understandable the geostatistical methodology and its interests to the different stakeholders (site owners, authorities, ...)
- Difficulties to find geostatisticians for performing the studies
- Other or details: _____

Do you see **improvements** or do you have **suggestions** to make easier the application of geostatistics to polluted sites?

Thanks for sending back the filled questionnaire by email to: jeannee@geovariances.com.