

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

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

**CRITICAL FEEDBACK ON THE USE OF GEOSTATISTICAL
METHODS FOR THE CHARACTERIZATION OF
CONTAMINATED SITES**

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 – 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.

- ✓ En Bibliographie, le document dont est issue cette synthèse sera cité 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

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.

1. Objectifs et moyens mis en œuvre

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. Jeannée, 2001¹ et H. Demougeot-Renard, 2002² pour des cas de pollutions chimiques, et Desnoyers, 2010³ 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 GeoSiPol⁴.

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, l'étude visait 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 était 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.

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 et **celui de l'expert géostatisticien** amené à traiter des données de sites et sols pollués.

Le travail réalisé a permis d'établir un bilan 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.

Plusieurs angles d'analyses ont été adoptés pour aboutir à ce bilan : analyse de la complémentarité de la géostatistique avec l'acquisition de données géophysiques ou de mesures in situ, synthèse bibliographique des travaux publiés dans différents pays, enquête auprès d'acteurs impliqués dans la caractérisation de sites pollués (bureaux d'étude, industriels, organismes publics), analyse du contexte réglementaire dans différents pays, illustration d'applications via des fiches de cas.

Ces éléments ont été complétés par un **état de l'art synthétisant les principaux objectifs et concepts géostatistiques** ainsi que les réponses qu'ils apportent aux questions métiers rencontrées

¹ Jeannée, 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.

² 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. Retrieved from <http://www.vdf.ethz.ch/>

³ Desnoyers, Y. (2010). *Approche méthodologique pour la caractérisation géostatistique des contaminations radiologiques dans les installations nucléaires*. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris.

⁴ <http://www.geosipol.org>

en SSP. 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) y ont été intégrés. Cette synthèse se démarque néanmoins des précédentes par une vision plus large et plus critique de la problématique.

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.

Le présent résumé synthétise les résultats marquants obtenus au terme de l'étude, incluant :

- Un **bilan** de l'utilisation actuelle de la géostatistique, avec ses bénéfices mais aussi les problèmes qui subsistent,
- Les **leçons** que l'on peut en tirer et des **recommandations**,
- Des **réponses pratiques** aux questions usuellement posées par les praticiens au sujet de la géostatistique et de sa mise en œuvre,
- Des **perspectives de recherche et développement** qui permettraient de répondre à certaines attentes métiers.

Les éléments d'analyses sur lesquels s'appuient ces résultats sont brièvement décrits en annexe.

2. Bilan de l'utilisation actuelle de la géostatistique

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.

On note que les études apparaissent **fréquemment réalisées par des personnes de bon niveau en géostatistique** et sont perçues pour la majeure partie d'entre elles comme un **succès, qui peut être total ou partiel**. Les objectifs visés concernent 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, évaluer les volumes de sols à dépolluer, les incertitudes et risques financiers associés ou 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 dans certains cas :

- **Inadéquation entre le cas rencontré** (site, données) **et les résultats attendus** de la modélisation géostatistique, due par exemple à des données très peu nombreuses, mal réparties ou de médiocre qualité ou encore à un phénomène de pollution très hétérogène.
- **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'étant usuellement pas considérée comme un interlocuteur-clé du projet. **La communication sur l'incertitude** est notamment un sujet délicat : l'absence de quantification des incertitudes par des méthodes empiriques ou déterministes ne doit par exemple pas être interprétée comme une absence d'incertitude. Mais à l'inverse, 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 :

- **Surcoût engendré par 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 ?
- **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, par ailleurs relativement flous sur le choix d'une maille de dépollution, la nature des contrôles après dépollution, etc. ?

- **Logiciels** : certains participants à l'enquête ont souligné le manque d'outils logiciels adaptés au domaine des sites pollués.
- **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.
- **Démonstrations** : en dépit des efforts importants consentis durant les dernières années, le nombre de cas réels rendus publics permettant de démontrer la validité d'une démarche géostatistique, est encore jugé trop faible.

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, même si les thèmes abordés par les équipes de recherche laissent transparaître encore quelques légères difficultés méthodologiques.

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 réalisation réussie 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 ?

3. Leçons à tirer et recommandations

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

- **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.
- **Améliorer la communication entre les différents acteurs** : deux voies sont proposées, articulées autour d'une sensibilisation des différents acteurs à la méthodologie géostatistique (concepts, méthodes, hypothèses de travail) et d'une plus forte implication du géostatisticien dans le projet s'accompagnant d'une familiarisation avec les contraintes métiers.
- **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 se traduise par une meilleure compréhension de la pollution et donc une meilleure prise de décision. Il est important de sensibiliser les donneurs d'ordre quant à la valeur ajoutée de la géostatistique et aux risques liés à l'absence de quantification de l'incertitude affectant toute estimation. Il semble également fondamental, pour éviter une politique du « moins disant » en phase d'investigation, de raisonner en coût global de projet, incluant à la fois les coûts d'investigation, mais surtout ceux de dépollution. **Il est aujourd'hui reconnu 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 suivante).

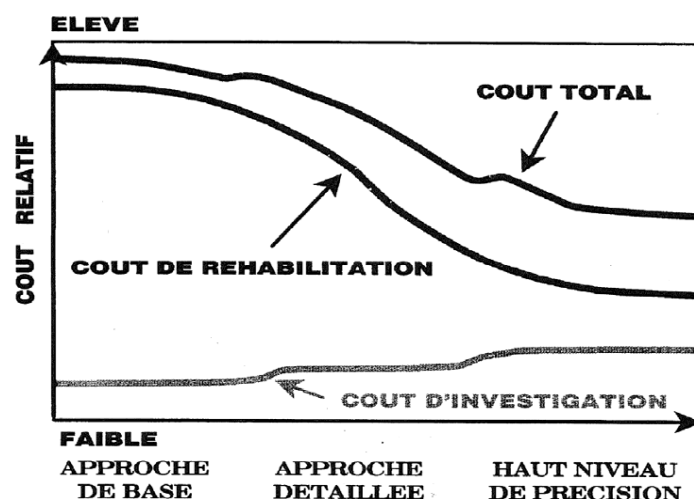


Figure 1 : Lien entre niveau de détail des investigations (abscisse) et coûts associés⁵.

- **Présenter la géostatistique dans les documents méthodologiques officiels** avec une discussion sur ses avantages et inconvénients.
- **Disposer d'outils logiciels adaptés**, dont l'offre est en réelle progression, en considérant différents critères de choix : complexité des études amenées à être traitées et de leurs objectifs, niveau de connaissance des méthodes géostatistiques et des méthodes de programmation des utilisateurs et temps à disposition, appui à l'utilisation du logiciel et mises à jour fournies par l'organisme ayant développé le logiciel.
- **Faire un effort de formation et d'information** : Il existe actuellement deux types de formations en géostatistique : 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. Le développement actuel de séminaires courts semble répondre au besoin des acteurs d'être sensibilisés plus que réellement formés à la mise en œuvre d'une approche géostatistique.
- **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, car ce type de confrontation est considéré comme une des démonstrations les plus convaincantes de l'intérêt de la géostatistique pour les sites pollués.
- **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 (cas du JORC dans le domaine minier, ATSM dans le domaine des sites et sols pollués aux USA).

4. Décider de la pertinence d'une étude géostatistique

Des réponses pratiques sont données ici aux questions fréquemment posées sur l'utilisation de la géostatistique pour caractériser les sites pollués. Elles visent à aider à apprécier l'intérêt d'une étude géostatistique à un stade d'investigation pour un objectif donné.

- « **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.

⁵ D'après 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.

- « **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.). Les objectifs d'étude pouvant être atteints seront d'autant plus ambitieux que le nombre de données à disposition est important, comme décrit dans le Tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 : Relation entre objectif d'étude, nombre de données nécessaires, type d'approche géostatistique et coût/temps associés.

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

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).

- « **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 (homogénéité des protocoles d'échantillonnage et d'analyse, homogénéité entre les campagnes, localisation précise des mesures,...). De ce fait, il est important que la personne en charge de la modélisation puisse être impliquée lors des réflexions sur la stratégie d'échantillonnage.
- « **Mon site n'est-il pas complètement hétérogène ou trop complexe ?** » Certains sites peuvent s'avérer complètement hétérogènes. Une absence de continuité spatiale de la contamination peut alors être observée, empêchant toute sélection des terres compatibles ou non par rapport à un dépassement de seuils (sauf à accepter un risque très élevé de mauvaise classification des terres). Une modélisation géostatistique sophistiquée s'avère peu pertinente dans pareil cas. En revanche, la géostatistique peut mettre en valeur l'incertitude et préciser les conditions d'investigation suffisantes pour valider cette hétérogénéité sans multiplier les données collectées.
- « **Combien va me coûter une étude géostatistique et pour quel bénéfice ? Le jeu en vaut-il la chandelle ?** » Dans le cas favorable où une continuité spatiale a pu être identifiée, 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. S'il s'avère que la pollution ne présente pas de continuité spatiale suffisante, l'approche géostatistique permet de le démontrer, pour un investissement d'analyse exploratoire usuellement léger.
- « **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), niveau de détail du programme de travail proposé, logiciels utilisés, exigences liées à la communication et aux livrables,...

5. Perspectives

Plusieurs axes de recherche et développement qui permettraient de répondre à certains problèmes rencontrés par les professionnels des sites ont été identifiés :

- **Valorisation expérimentale d'informations indirectes** (MIP, géophysique). L'objectif serait de montrer 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,
- **Intégration d'informations qualitatives indirectes dans les modèles**, telles que des résultats géophysiques ou des informations historiques. Le but visé serait de répondre à certaines difficultés méthodologiques subsistant à l'heure actuelle et génératrices d'incertitudes dans les modèles.
- **Etude du couplage de modèles géostatistiques de pollution et de modèles d'évaluation des risques sanitaires**. 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,
- **Evaluation du flux massique de polluants (hydrocarbures chlorés) à l'aide de mesures indirectes et de géostatistique**. Alors que la caractérisation des sites pollués aux hydrocarbures chlorés constitue encore à l'heure actuelle un défi de taille pour les professionnels, il serait utile de mener un travail visant à déterminer les conditions optimales de quantification du flux de polluant, en se basant sur un couplage des méthodes géostatistiques et des moyens d'instrumentation actuels (p.ex. dispositifs multilevel, mesures sur site,...).
- **Intégration des contraintes de chantier** dans le modèle géostatistique pour garantir autant que possible la cohérence entre la prédiction et la réalité du terrain.

Annexe : Eléments d'analyse

Sans être exhaustive, cette annexe rappelle les éléments de l'étude sur lesquels se basent les conclusions et perspectives présentées aux chapitres 2 et 3 ci-dessus.

Les méthodes géostatistiques applicables aux SSP

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 répartition spatiale de la pollution grâce à des 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.

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. Afin d'y répondre, le rapport présente de manière synthétique les concepts et méthodes de la géostatistique qui y sont adaptés.

L'intégration de données géophysiques et de mesures sur site

Le rapport présente les techniques géostatistiques adaptées à l'intégration d'informations renseignant indirectement sur l'état de pollution d'un site, et rapporte les expériences actuelles d'application de la géostatistique aux données géophysiques et mesures sur site. Les expériences pratiques actuelles peuvent être résumées comme suit.

Les données géophysiques et de terrain sont souvent utilisées pour désigner des zones propices aux sondages ou à l'implantation de piézomètres. La géostatistique est assez fréquemment utilisée pour interpoler directement les mesures géophysiques et ce avec de très bons résultats. Divers systèmes automatiques ont d'ailleurs été créés pour collecter les données en temps réel, puis réaliser des traitements géostatistiques et afficher sur site les résultats (p.ex. Kartotrak de Geovariances, FAST de USEPA région 5).

Ces données peuvent également être intégrées dans les modèles géostatistiques en tant que variables auxiliaires, mais une telle intégration n'a cependant été observée dans la pratique que dans de rares cas.

De manière plus générale, l'emploi combiné de mesures sur site ou géophysiques et de la géostatistique est souvent perçu par les professionnels 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.

Cependant, plusieurs barrières à la diffusion de ces techniques sont avancées :

- Institutionnelles : les guides officiels ne prennent en général pas en compte les concepts d'incertitude, de support de la mesure ou autres concepts géostatistiques pertinents ; des certifications ne s'appliquent pas encore aux études géostatistiques : l'aspect juridique des décisions prime souvent sur le succès ou les aspects techniques des dépollutions,...
- Financières : les budgets d'étude des sites pollués sont souvent très insuffisants,...
- Individuelles : peur de ne pas respecter le budget d'étude alloué, décisionnels ne connaissant pas les possibilités techniques offertes,...

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 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 et l'autre présentant des méthodes pour évaluer l'atteinte des objectifs de dépollution sur les sols.
- 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, dans son guide d'échantillonnage des sols . De plus, la directive de 2012 sur la réalisation des évaluations des risques toxicologiques éditée par l'institut national de la santé publique 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 édité par l'office fédéral de l'environnement, destiné aux pollutions diffuses affectant le sol pédologique.
- Depuis 2007 en France, le guide méthodologique sur les diagnostics de sites 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.

- 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'.
- En Wallonie, le guide final de référence pour l'étude de caractérisation (GREC) des sols est paru le 30 septembre 2012. La géostatistique 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.

L'enquête auprès des professionnels et les fiches de cas

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. Il a été transmis, à la fois en français et en anglais, à plus de cent contacts des auteurs de l'étude. Une version anglaise allégée a également été distribuée au sein des membres du réseau NICOLE et du Common Forum. A l'issue de l'enquête, 25 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.

Parmi ces 25 réponses, 3 sont issues des réseaux NICOLE et du Common Forum. La plupart des personnes ayant répondu sont basées en France puis viennent la Suisse et la Belgique ; une attention particulière a néanmoins été accordée aux réponses émanant de pays plus « lointains », tels que l'Irlande, le Québec ou le Brésil.

Les questionnaires 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 quelques cas valorisables sous forme d'exemples dans l'étude. Ces « fiches sites » sont présentées dans le rapport et quatre d'entre elles ont pu être détaillées dans un chapitre spécifique illustrant, pour chacune, le contexte (site, pollution, auteur de l'étude), les objectifs attendus et l'approche mise en œuvre, les résultats obtenus et une analyse critique de ces derniers.

Les outils (logiciels) et offres de formations actuels

Un inventaire non exhaustif de l'offre actuelle de logiciels et de formations est dressé dans le rapport.

Les 13 logiciels recensés se répartissent 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.

Des critères de choix des logiciels sont proposés dans le rapport.

Les offres recensées 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.

L'état de la recherche actuelle

L'étude des derniers travaux de recherche ayant trait à l'application de la géostatistique aux sites et sols pollués a mis 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.

1. Objectives and methods

Geostatistics has been used for the characterization of contaminated sites for about fifteen years. After a period of doubt, its benefits are now identified by the different actors thanks to many real case studies. Several Ph.D. theses have been dedicated to the subject, both for chemical Jeannée, 2001⁶ and H Demougeot-Renard, 2002⁷ and radiological pollution Desnoyers, 2010⁸. Thanks also to the working groups such as GeoSiPol⁹ in France, **geostatistics is now recognized as one of the appropriate solution for the characterization of contaminated sites**. It provides a thorough methodological framework for optimizing sampling strategies, mapping the contamination and assessing the compatibility with future land use. In addition, it allows the integration of several types of measures when available: laboratory analyses, on-site measurements, geophysical surveys, etc.

However geostatistics is not a universal answer **and its application requires expertise and an effective communication between the different actors**. When some of these elements are lacking, it can generate disappointment and provide inadequate results.

After fifteen years of application, which report can be drawn up of geostatistics, either at national or international level?

In this framework, the project consists in making a **critical and objective feedback of the use of geostatistics**. The objective is to draw up a factual report (On how many known cases of polluted sites was geostatistics used? Under which circumstances and for which objectives?), and then to make a detailed analysis of the results (Did results provided by geostatistics give satisfaction? What are the reasons that led to the success or failure of the operation?) to deduce possible ways of improving the current situation.

The project team was formed to get a **double point of view, the one of the polluted sites expert** who needs to use geostatistics (ANTEA) and **the one of the geostatistical expert** who analyses data from contaminated sites (GEOVARIANCES and eOde).

The work results in a review of the current use of geostatistics for characterizing contaminated sites and allows discussing its **complementarity with investigation techniques** such as geophysics. **Recommendations of best practices** are following in order to ensure the success of its application in an operational context. Research and development themes that would fill theoretical or methodological gaps identified during the projects are also proposed.

Several elements of analysis have been developed to achieve this review: analysis of the complementarity between geostatistics and the acquisition of geophysical or in situ measurements, international literature review, survey among actors involved in the characterization of contaminated sites (consulting firms, industrial groups and institutional agencies), analysis of the regulatory context in different countries, illustrative case studies.

These elements have been completed by an **overview summarizing the main objectives and geostatistical concepts** and the answers they provide to issues encountered in the context of contaminated sites. The results of works already funded by ADEME (R&D projects Outrage and Reperage, methodological and case studies reports of the working group GeoSiPol) have also been integrated. This study, however, differs from the preceding ones by having a broader and more critical point of view.

The study addresses the issue of chemical and radiological pollution, whether diffuse or localized, potentially affecting the following media: soil (wasteland, dumps...), sediment (rivers, harbors...) and concrete (installations being dismantled). Groundwater pollution is beyond the scope of this study.

The following pages summarize significant results obtained at the end of the study, including:

- A **review** of the current use of geostatistics, including its benefits but also remaining issues,
- The **lessons** that can be learned and some **recommendations**,

⁶ Jeannée, 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.

⁷ 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/>

⁸ Desnoyers, Y. (2010). *Approche méthodologique pour la caractérisation géostatistique des contaminations radiologiques dans les installations nucléaires*. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris.

⁹ <http://www.geosipol.org>

- **Practical answers** to questions commonly asked by practitioners about geostatistics and its implementation,
- **Research and development perspectives.**

Elements of analysis that support these results are briefly described in the appendix.

2. Assessment of the present use of geostatistics

The survey shows that geostatistics has been implemented during the last 15 years on a significant number of sites corresponding to varied activities and issues.

Geostatistical studies appear to be frequently **accomplished by people having a good level in geostatistics** and led for most of them to a **total or partial success**. The most common objectives are pollution mapping and quantification of soils volumes to be decontaminated.

Actors who have been faced to it evoke the interest of the geostatistical approach to visualize the pollution in 2 or 3 dimensions, to assess the volumes of soil to be remediated, to quantify the uncertainties and financial risks and to optimize new sampling campaigns given the already collected information.

The cost / benefit ratio of a geostatistical modeling is also considered as positive by a majority of the survey participants.

However, people are regularly facing problems which may contribute to disappointment in particular cases:

- **Mismatch between the context** (site, data) **and the expected results** of geostatistical modeling, e.g. due to a lack of data, poorly distributed, of poor quality... or to a very heterogeneous pollution.
- **Communication problems** between the numerous stakeholders (site owner, consulting firm responsible of the diagnosis, geostatistician, site remediation company, authority): the person in charge of the geostatistical study is usually not considered as being a key partner in the project. **Communication regarding uncertainties** is especially a difficult subject: for example, the lack of uncertainty quantification by empirical or deterministic methods should not be interpreted as an absence of uncertainty. Conversely, uncertainty quantification by geostatistical methods should not be seen as an imperfection of the method...

Several obstacles to a more recurrent use geostatistics have also been identified:

- **Additional cost** generated by the geostatistical study: how to convince the client to invest in a methodology that is not discussed in the methodological guides?
- **Authorities' position**: how to convince the client of the merits of an approach that is not discussed in the official methodological guides, which are also relatively vague about the choice of the remediation mesh, the type of control samples after cleanup, etc.?
- **Software**: a certain lack of software tools tailored to the domain of polluted sites is pointed out.
- **Training and information**: professionals are not enough trained to geostatistical methods and application software, a lack of information of actors involved in the management of contaminated sites is also identified.
- **Demonstration**: despite significant efforts in recent years, the number of case studies made available to prove the validity of a geostatistical approach is still considered too low; confidentiality issues and the lack of feedback about the remediation are the main reasons for this low number of demonstration cases.

The literature review shows that geostatistical approaches applied to contaminated sites are now well understood by specialists, although the themes addressed by research teams reveal a few remaining methodological difficulties.

The study of the present situation of implementation of geostatistics shows, however, that practical questions remain about the conditions for a successful completion of a geostatistical study, such as: in which cases should I, as client, prescribe such a study? When should I, as a consulting firm, propose one?

3. Lessons and recommendations

Several improvement avenues have been identified to solve the issues and obstacles discussed above:

- **Adapt expected outcomes of the geostatistical modeling to the practical case** (site, data): before the investigations, it is essential to consider carefully the consistency between the objectives, the nature of the investigations AND the relevance of a geostatistical modeling.
- **Improve communication between different actors**: by improving the knowledge of the different actors about the geostatistical methodology (concepts, methods, working hypotheses) and involving more closely the geostatistician in the project to ensure he is familiarized with the project practical constraints and expectations.
- **Analyze the cost-benefit of a geostatistical study**: the cost of a geostatistical study must be weighed against the benefit obtained, either during cleanup or resulting in a better understanding of pollution and thus better decisions. It is important to raise awareness of the clients about the added value of geostatistics and the risks related to a lack of quantification of the uncertainty associated to any volume estimate. It also seems important to avoid a policy of "lowest bidder" during the phase of investigation, and instead to base the decision on the global cost of the project, including both investigation and remediation costs. **It is now recognized that a detailed and accurate investigation, even if it results in a higher cost, leads to significant savings during the remediation phase** (see figure below).

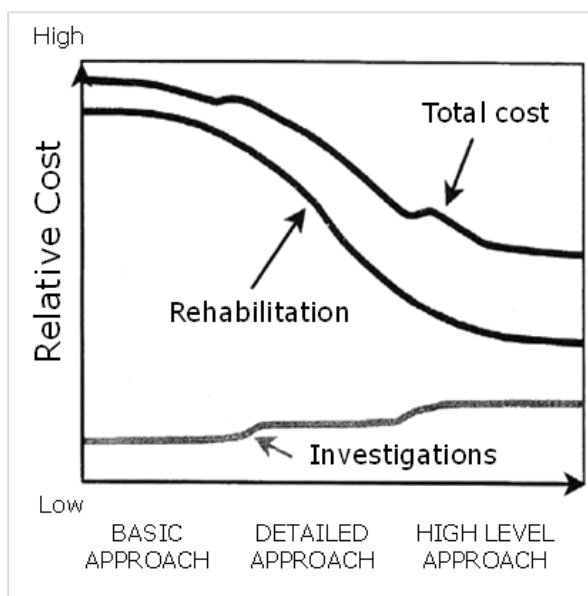


Figure 1: Relationship between the investigations level of details (abscissa) and the related costs¹⁰.

- **Present the geostatistical methodology in official documents** including a discussion of its advantages and limitations.
- **Have appropriate software tools**, which offer is increasing, considering various selection criteria: complexity of the studies to be processed and their objectives, level of knowledge of geostatistical and programming methods and users' time available, software support and updates provided by the software vendor.
- **Develop training and awareness programs**: two types of geostatistical training are currently available: trainings aiming at taking in hand a geostatistical software or developing their own tools, and trainings focused on concepts and methods. The development of short seminars seems to meet the needs of actors who need to be aware of the geostatistical approach without an effective need to apply it personally.

¹⁰ From 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.

- **Present case studies with contaminated volumes validation:** a major effort still needs to be made by the entire profession to make available studies which include comparisons between predicted volumes (using a geostatistical approach) and volumes actually remediated. This type of confrontation is indeed considered as one of the most convincing demonstrations for the added value of geostatistics for contaminated sites.

4. Assess the relevance of a geostatistical study

Practical answers are given here for frequently asked questions about the use of geostatistics to characterize contaminated sites. They aim at helping to evaluate the benefits of a geostatistical study during the investigations stage for a given objective.

- **"When should I ask whether geostatistics is relevant in my case?"** Ideally at the end of the historical and informative studies and preliminary investigations (diagnosis) which are highlighting a pollution (removal of doubt) that will likely require measures to reduce the risk.
- **"Do I have or can I acquire enough data?"** The need to collect data comes from both a suspicion of pollution and a lack of understanding about its spatial distribution (insufficient historical information, site heterogeneity, etc.). The study objectives that can be achieved will be more ambitious depending on the amount of data, as seen in Table 1 below.

Table 1: Relationship between study objective, required number of data, geostatistical approach and associated cost/time.

Objective	Min. nb. of data	Geostatistical approach	Cost/time
Data quality control and summary	~10-15	Basic tools: elementary statistics, histograms, scatter plots, data localization maps.	A few hours
2D/3D mapping of contamination	> 20	Kriging interpolation. Recommendation: when data are in a limited number, be careful about the interpretation of the maps and communicate about the uncertainties.	A few hours, usually integrated in the consulting firms services
Estimation of contaminated volumes (3D)	>25-30 (>3-4/ boreholes)	Estimation of contaminated masses and associated uncertainties, soil classification, sampling optimization to reduce uncertainties	A few days to a few weeks, individual service

Remark: on small sites and when pollution understanding is good, the number of measurements is often limited. In those cases, it is not appropriate to try to interpolate the measurements, associated uncertainties being generally very high. Be especially careful with fast deterministic interpolations and prefer a simple representation of the measurements (data location).

- **"Do I have data of adequate quality?"** Geostatistics is sometimes perceived as needing particular requirements concerning data quality. It is important to keep in mind that it just consists in a formalization of much more general recommendations. Indeed, knowing the complexity of the phenomena to characterize, it is essential to be able to rely on data quality (homogeneity of sampling and analyzing protocols, consistency between campaigns, precise location of measurements...). Therefore, it is important to involve the person in charge of modeling in the discussions about the sampling strategy.
- **"Is it possible that my site is completely heterogeneous or too complex?"** Some sites may be completely heterogeneous. A lack of spatial continuity for the contamination can then be observed, preventing the sorting of soils between compatible or not given a threshold (except if a very high risk of misclassification of soils is accepted). A sophisticated geostatistical modeling is irrelevant in this case. However, geostatistics can highlight the uncertainty and clarify the sufficient conditions of investigations that could confirm this heterogeneity without increasing much the number of collected data.
- **"How much will cost a geostatistical study and for which benefit? Is it worth the effort?"** In the favorable case where spatial continuity has been identified, it is possible to make a thorough estimate of the contaminated areas, to quantify uncertainties, etc. The application of geostatistics is then classic, required cost and time then depending on objectives. If it appears that the contamination has no sufficient spatial continuity, the geostatistical approach helps in proving this assumption, for an investment during exploratory analysis usually light.

- **"As a client, what are the requirements to ask for a geostatistical study and how to evaluate the quality of the replies?"** When writing the specifications, it is important to ask for the following information: experience / competence of the team, references in this area (projects), level of detail of the proposed work, used software, requirements for communication and deliverables ...

5. Perspectives

Several R&D themes that would answer some encountered issues have been identified:

- **Experimental integration of indirect information** (PID, geophysics). The objective would be to show how to enhance the use of indirect measurements, such as PID logs or geophysical measurements in a geostatistical framework, on a real case study that would be available for the purpose of experimentation,
- **Integration of indirect qualitative information in models**, such as geophysical results or historical information. The goal would be to address some methodological difficulties remaining at the present time and generating uncertainties in the models,
- **Study of the combination of geostatistical models and health risk assessment models**. The objective would be to clarify the conditions required to integrate the spatial distribution of a contamination in the assessment of health risks, and to explain how these results can be used operationally and recognized by the authorities,
- **Evaluation of the mass flux of pollutants (chlorinated hydrocarbons) using indirect measurements and geostatistics**. While the characterization of sites contaminated by chlorinated hydrocarbons is still challenging for professionals, it would be useful to determine the optimal conditions for the quantification of pollutant mass discharge, combining geostatistical methods and recent instrumentation means (e.g. multilevel devices, on-site measurements...).
- **Integration of remediation works constraints** in the geostatistical model to ensure as far as possible consistency between the prediction and the remediation works' conditions.

Appendix: Elements of analysis

Without being exhaustive, this appendix recalls the elements on which are based the study conclusions and perspectives presented here above.

Practical geostatistics for contaminated sites

The characterization of contaminated sites is necessary for their management in multiple contexts: accidental pollution, disposal or acquisition of a site, management of excavated soils for a real estate project, decommissioning of a nuclear facility, forecast before dredging a river or a harbor in order to restore good sailing conditions. This characterization may aim at reaching various objectives.

- Sampling strategy optimization: how to reach a sufficient level of knowledge in relation to the objective, with the smallest number of data well located?
- Doubt removal (identification of sources, of hot spots...);
- Understanding the spatial behavior of the pollution thanks to mapping;
- Assessment of the soil compatibility with the future land use of the site;
- Computation of contaminated volumes, masses or surfaces beyond a threshold;
- Orientation of the excavation or treatment of contaminated soils and materials (e.g. concrete).

Then the question of the interest of geostatistics in order to support the completion of these tasks is raised, together with the question of the most appropriate methods. To answer these questions, the report summarizes suitable geostatistical concepts and methods.

Integration of geophysical data and on-site measurements

The report presents geostatistical techniques suited for integrating indirect information on the site pollution and relates current experiences of the application of geostatistics to geophysical data and on-site measurements. Current practical experiences can be summarized as follows.

Geophysical and on-site data are often used to locate areas suitable for the implantation of surveys or piezometers. Geostatistics is frequently applied successfully to directly interpolate geophysical measurements. Various automatic systems have also been created to collect data in real time, perform a geostatistical processing and display the results while on the site (e.g. Kartotrak from Geovariances, FAST from USEPA Region 5).

These data can also be integrated into geostatistical models as auxiliary variables, but such integration, however, is still rarely observed in practice.

More generally, the combined use of on-site or geophysical measurements and geostatistics is often perceived by professionals as allowing:

- To better characterize a site,
- To take good decisions,
- To better assess the risks and finally,
- To achieve better remediation.

However, several barriers to a more frequent use of these techniques are put forward:

- Institutional: regulations and official guides generally do not consider the concepts of uncertainty, measurement support and other relevant geostatistical concepts; certifications do not yet apply to geostatistical studies: the legal decisions often takes precedence over the success or the technical aspects of remediation...
- Financial: budgets allowed to the study of contaminated sites are often insufficient...
- Individual: fear of not respecting the budget allocated for the study, decision makers not knowing the technical possibilities...

Position of regulatory authorities

Methods and tools for the assessment and remediation of contaminated sites are not mentioned in the legal framework of the different countries, but in the methodological guides, directives and helping guides for professionals. Looking for recommendations on the use of geostatistics in various official guides of some European and North American countries highlights the following positions:

- Since 1989, the environmental protection agency of the United States (U.S. EPA) recommends the use of geostatistics and presents the block kriging technique as a solution for mapping pollution of contaminated sites inside two guides, one for quality assurance of sampling and the other one presenting methods to evaluate the achievement of objectives during remediation of soils.
- Since 2008, the « Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec » (depending on the Ministry in charge of environment) mentions geostatistics in its guide for soil sampling as a tool for optimizing the sampling scheme of contaminated sites that have a significant number of samples. In addition, the 2012 Directive on the achievement of toxicological risk assessments published by the National Institute of Public Health recommends the use of geostatistics for sampling data as a support to the evaluation of risks associated to remediation projects.
- Since 2003 in Switzerland, geostatistics is mentioned as a possible tool for data interpretation in the manual of soil sampling published by the Federal Office for the Environment.
- Since 2007 in France, the methodological guide for sites diagnosis from the Ministry in charge of environment mentions geostatistics as a possible tool for data interpretation and considers geostatistics, just as statistics, as optimization methods of the mesh pattern for systematic soil sampling.
- In the state of Baden-Württemberg in Germany, geostatistics is merely mentioned in study or research reports of specific sites conducted during the 1990s and 2000s.
- In Wallonia, the final guide for the study of characterization (GREC) soil was published on September 30, 2012. Geostatistics is described as a suitable method for the characterization of backfills or the characterization and delineation of pollution spots for complex sites, where data are in large number.

Survey amongst professionals and case studies sheets

A questionnaire was developed to get a feedback on the perception of the application of geostatistics among actors involved in the management of contaminated sites. It was transmitted in both French and English to over a hundred of contacts. A simplified English version has also been distributed within the NICOLE network and Common Forum members. At the end of the survey, 27 replies were received from people who have been faced with geostatistical studies. At least 5 replies of actors who have never been faced with such studies have also been identified.

Within these 27 responses, 3 are from NICOLE and Common Forum networks. Most respondents are based in France and then in Switzerland and Belgium; a particular attention has been paid to the answers from more "distant" countries, such as Ireland, Quebec and Brazil.

The questionnaires were built so as to understand, depending on the type of actor answering, his use of geostatistics (expertise, subcontracting, confrontation as an authority...), his/her perceived usefulness of the approach as well as recommendations and perspectives that would optimize its efficiency.

In addition, "case study sheets" were sent to observe real cases of use of geostatistics and get some valuable examples in the study. These "case study sheets" are presented in the report and four of them have been detailed in a specific chapter illustrating the context (site, pollution, author of the study), the expected objectives and the chosen approach, the results and a critical analysis.

Existing software and training offer

A non-exhaustive list of currently available software and trainings is drawn in the report.

The 13 identified software fall into five broad categories:

1. Software dedicated to geostatistics: some general (1.a) that can therefore be used in a variety of fields (e.g. oil, mining, health, air, water...), others developed for a specific domain of application (1.b), including contaminated sites.
2. Geographic information systems (GIS, 2D) which integrate geostatistical tools.
3. 3D software for the subsurface visualization (geotechnical engineering, mining, environment) incorporating geostatistical tools.
4. 3D modeling software for underground reservoirs (oil, mining) incorporating geostatistical tools.
5. Programming languages enabling the development of computational tools needed for geostatistical modeling. Some authors, often academics, make available to the public geostatistical computer codes they have developed for their own needs.

Software selection criteria are available in the report.

Geostatistical training offers for professionals are of two types:

1. Trainings to take in hand a geostatistical software or to develop his own tools,
2. Training to learn the concepts of geostatistics and the conditions of its application to a given domain.

On-going research themes

Analysis of the latest research related to the application of geostatistics to contaminated sites highlighted the following trends.

- Geostatistical approaches tailored to the issues raised by the contaminated sites are now well established. The current research efforts are led to refine existing methods and find solutions to some remaining problems.
- Some comparisons of geostatistical methods to emerging spatio-temporal modeling have been conducted in recent years, but without convincing demonstration of the superiority of one method over the other.
- The coupling of geostatistics with other models useful to assess the contamination has been tested. It emphasizes its interest to include the uncertainty due to the spatial variability of

pollution, whether in health risk assessment, modeling of flow and transport of pollutants or multi criteria analysis that assist in the selection of the remediation projects.

- Many studies have been devoted to the search for optimized sampling strategies, based on a geostatistical model allowing the quantification of local (mapping) or global uncertainties in order to choose the “best” locations for additional sampling points. Joint use of rapid on-site measurements and geostatistical techniques allow considering for rapid investigation campaigns where the number of collected data is multiplied and with an optimized positioning, while converging to a better accuracy of maps and estimates of pollution quantities of contaminated materials.
- Validity tests to confront geostatistical models with reality are rare in the literature, probably partly because of the difficulty of the question and the scarcity of available data sets. The few available examples show a good consistency between the model and reality, provided that the model reproduces finely the data intended to represent the reality.
- The application of geostatistics for modeling pollutant mass flux through a transect appears as an emerging field over the last five years. It comes with the current trend to characterize small-scale flux of pollutants whose spatial variability can be very large decimeter or centimeter, such as chlorinated hydrocarbons.