



Keshia Koutekissa



Année universitaire 2017 - 2018

Master Ingénierie de la Santé

Mémoire de fin d'études
Master 2^{ème} année

La perception de la géostatistique dans la réalisation
du diagnostic des sites et sols pollués

Composition des membres du jury :

Président du Jury : Dr Franck-Olivier Denayer, Doyen de la Faculté d'Ingénierie et Management de la Santé (ILIS).

2^{ème} membre du Jury : Dr Florent Occelli, Directeur du mémoire et Maître de Conférences Environnement & Santé (Université de Lille 2).

3^{ème} membre du Jury et invité Professionnel : Dr Nicolas Jeannee, Directeur Solutions Ressources Naturelles (Dassault-Systèmes).

Date de soutenance : Vendredi 12 Octobre 2018

Faculté Ingénierie et Management de la Santé – ILIS

42 rue Ambroise Paré

59 120 LOOS

Remerciements

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui m'ont apporté leur soutien dans la réalisation de ce mémoire.

Je souhaite adresser dans un premier temps mes remerciements à Monsieur Florent Occelli, docteur et maître de conférences « Environnement et Santé humaine » à l'Université Lille de France (Droit et Santé - Lille 2) et à la Faculté d'Ingénierie et de Management de la Santé (UFR ILIS). En tant que directeur de mémoire, Monsieur Occelli a répondu présent pour me guider dans mes recherches, ma rédaction et me partager son avis sur le sujet.

Je voudrais remercier les membres du jury, Mr Franck-Olivier Denayer, Doyen de la Faculté d'Ingénierie et de Management de la Santé (UFR ILIS) et Mr Nicolas Jeanne d'avoir accepté d'évaluer ce mémoire.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes, ami(e)s, collègues et famille qui ont contribué à ma réflexion par leur soutien, leurs avis et leurs conseils.

Je tiens aussi à remercier le personnel enseignant de la Faculté Ingénierie et Management de la Santé, ILIS, pour les connaissances et compétences acquises durant ma formation. Je les remercie également pour l'aide et les encouragements qu'ils m'ont apportés durant mon cursus.

Enfin, je remercie l'ensemble des personnes qui ont eu l'amabilité de prendre du temps pour répondre au questionnaire qui m'a permis de mener à bien les recherches de ce mémoire.

Sommaire

Remerciements	2
Table des figures	3
Table des tableaux	4
I. Introduction	5
I. Méthodologie de l'étude.....	7
II. Les incertitudes liées aux diagnostics des sites et sols pollués.....	10
III. Géostatistiques appliquées aux échantillonnages des sites et sols pollués dans la réduction des incertitudes	17
IV. Questionnaire et analyse de la situation actuelle	30
V. Axes d'amélioration et perception d'autres pays	45
VI. Conclusion	51
Bibliographie	53
Table des matières	55
Annexes	57
Glossaire	69
Résumé	70

Table des figures

Figure 1: histogramme des données de mercure (à gauche) et évolution des teneurs en mercure avec la profondeur (à droite) (UPDS, 2016).....	19
Figure 2: Exemple de variogramme expérimental (logiciel ArcGIS®) reprenant les valeurs des paires de points (rouge), leur moyenne (croix bleue) et le variogramme modélisé (ligne bleue) (Ocelli, 2014).	19
Figure 3: Cartes des concentrations dans les sols en solvants chlorés (échelle log[C], C en mg/kg MS): à gauche concentrations interpolées par krigeage et à droite, incertitudes liées au modèle de krigeage (UPDS, 2016).....	20
Figure 4: Carte de probabilité de dépassement du seuil de concentrations dans les sols en solvants chlorés (seuil retenu à 100 mg/kg MS, à gauche) et distribution statistique du volume de sol correspondant au dépassement (fréquences cumulées, à droite), (UPDS,2016).....	21

Figure 5: Cartographie des concentrations de Pb et de Zn dans les sols de la vallée du Meza avant et après les travaux d'assainissement, avec emplacement d'échantillonnage (en haut à droite) et zones présentant des concentrations critiques de Pb et de Zn indiquées par une ligne pointillée (Finzgar et al, 2014).	22
Figure 6: Cartes de la concentration moyenne de plomb dans le sol (a) et de l'écart type (b) obtenues par simulateur séquentiel gaussien (Guagliardi, I., et al., 2015).....	23
Figure 7: Carte de probabilité de dépassement du seuil de 100 mg / kg (Guagliardi, I., et al., 2015)..	24
Figure 8: Cartes de la teneur en Cd dans les sols des échantillonnages (a) et estimations de la teneur en Cd dans les sols utilisant le krigeage ordinaire OK (b), RK (Regression Kriging) avec combinaison de l'élévation variable auxiliaire (c), de la pente (d), TWI (e) distance par rapport à la zone résidentielle (f), types d'utilisation du sol (g), types de sol (h), toutes les variables auxiliaires quantitatives (i) et toutes les variables auxiliaires (j) (Cao et al, 2016).	27
Figure 9: Tranches d'âge des participants lors de l'enquête.	32
Figure 10: Pourcentage de participants utilisant la géostatistique.....	32
Figure 11: Graphique présentant la non-utilisation de la géostatistique.....	33
Figure 12: Graphique sur la fréquence d'utilisation de la géostatistique en bureau d'études SSP.	34
Figure 13: Graphique représentant le contexte d'utilisation de la géostatistique.	35
Figure 14: Graphique représentant la voie d'utilisation de la géostatistique.....	36
Figure 15: Pourcentage des acteurs ayant suivi une formation spécifique.	37
Figure 16: Tranche d'âge des acteurs utilisant la géostatistique.	37
Figure 17: Visibilité de la géostatistique par les acteurs.....	39
Figure 18: Graphique indiquant l'amélioration des incertitudes liée à l'utilisation de la géostatistique.	39
Figure 19: Graphique évaluant l'amélioration des incertitudes après utilisation de l'outil de géostatistique.	40
Figure 20 : Graphique évaluant les incertitudes résiduelles après utilisation de l'outil de géostatistique.	41
Figure 21: Pourcentage de recommandation de l'outil géostatistique par les acteurs.	42
Figure 22: Lien entre niveau de détail lors des investigations (abscisse) et coûts associés (d'après (Hubé, 2008)).	49

Table des tableaux

Tableau 1: Documents illustrant la géostatistique en sites et sols pollués.....	8
---	---

I. Introduction

Le diagnostic des sites et sols pollués (SSP) est une étape de la gestion des SSP qui permet de décrire l'état et les enjeux sanitaires et environnementaux de ces SSP, en s'appuyant sur des moyens proportionnés et appropriés, afin de sélectionner des mesures de gestion adaptées aux SSP et aux milieux environnants (MEDD, 2007a).

Il a pour objectifs principaux de localiser et de quantifier des pollutions dans des milieux différents (sols, eaux souterraines, ...), dans le but de caractériser des sources de pollutions (diffuses et concentrées), et des milieux d'exposition (MEEM, 2017b).

Lors du diagnostic des SSP, plusieurs incertitudes peuvent interférer dans l'établissement d'un bon diagnostic. Il a été démontré que les incertitudes les plus importantes se situent au cours de l'échantillonnage des sols (Record, 2014).

Pour ce faire, plusieurs études ont mis en place des moyens de réduction de ces incertitudes, parmi lesquelles, l'outil géostatistique dans l'analyse des sols. Cet outil permet d'analyser, d'interpréter et de cartographier les informations et données spatiales, spatio-temporelles issues des sources de pollution des SSP et d'en quantifier les incertitudes de façon précise.

Les guides de bonne pratique de gestion des SSP recommandent donc l'utilisation de la géostatistique pour réduire grandement les risques sanitaires et environnementaux causés par ces incertitudes. Cet outil a même été intégré dans la nouvelle version de la méthodologie nationale de gestion des SSP de 2017 (MEEM, 2017b).

Pourtant, les bureaux d'études éprouvent des difficultés à utiliser cet outil comme le démontre l'enquête réalisée en 2013 (Record, 2013). Alors, en quoi est-ce que la géostatistique appliquée au diagnostic des SSP est un outil utile ? Est-il possible de comprendre, par l'intermédiaire d'un questionnaire, les raisons pour lesquelles cet outil est si peu utilisé ?

Dans le but de répondre à toutes ces interrogations, ce mémoire se déploie en 5 parties. La première consistera en l'exposition de la méthodologie de ce mémoire, ensuite la seconde et la troisième partie permettront de comprendre respectivement ce que sont les incertitudes et leurs rôles dans le diagnostic SSP et l'apport de la géostatistique dans leur réduction. Enfin la quatrième et la cinquième partie présenteront les résultats du

questionnaire définissant la perception des ingénieurs et acteurs du domaine des SSP et les axes d'amélioration de cet outil géostatistique et de sa perception.

I. Méthodologie de l'étude

La méthodologie de l'étude a d'abord consisté en une étude documentaire, permettant de rappeler le contexte de l'étude avec les étapes du diagnostic des sites et sols pollués causant le plus d'incertitudes dont l'échantillonnage des SSP, les moyens de réduction de ces incertitudes et l'utilisation de la géostatistique dans l'échantillonnage des sites et sols pollués. Enfin une enquête a permis de montrer de quelle façon les ingénieurs en bureaux d'études utilisent cet outil, s'ils sont convaincus de son efficacité et de comprendre l'évolution de l'utilisation de l'outil afin d'en définir des axes d'amélioration.

Etude documentaire :

Il s'agit d'un état de l'art sur tous les documents permettant de cibler les incertitudes reconnues lors d'un diagnostic de sites et sols pollués, et en particulier lors de l'échantillonnage des sols.

Les documents ont été recherchés à travers les sites de l'association RECORD (REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement), de l'UPDS (Union des professionnels de la dépollution des sites), de Science Direct, et de l'US EPA, en utilisant des mots clés comme « incertitudes dans les sites et sols pollués », « géostatistique en sites et sols pollués », « sampling in polluted soils », « geostatistics and polluted lands », « mapping of polluted soils », « geostatistics in polluted soils ». Cette recherche a permis d'identifier certains documents présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1: Documents illustrant la géostatistique en sites et sols pollués.

Auteur	Titre	Source et Année de publication
De Giudici	Evaluations quantitatives des risques sanitaires de sites et sols pollués- analyse des sources de variations et d'incertitudes dans l'estimation des expositions : caractérisation, étude comparative et voies d'amélioration	Record, 2014
US EPA	Exposure Factors Handbook	US EPA, 2011
Jeannee et al	Retour d'expérience critique sur l'utilisation de méthodes géostatistiques pour la caractérisation des sites et sols pollués	Record, 2013
UPDS	Introduction à la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués	UPDS, 2017
MEDD, MEEM	Méthodologie nationale des sites et sols pollués (SSP)	2007, 2017
Geosipol	Manuel méthodologique	Geosipol, 2005
Geosipol	Guide pratique	Geosipol, 2012

Ainsi cet état de l'art a été fait en partie à partir de ces différents documents, et notamment le rapport de Giudici de 2014 (Record, 2014), faisant état des différentes incertitudes en diagnostic des sites et sols pollués et des axes d'amélioration de ces incertitudes parmi lesquelles la géostatistique semble être l'outil le plus pertinent pour la

réduction de ces incertitudes; le manuel méthodologique de Geosipol 2005 (Geosipol, 2005) qui explique les apports de la géostatistique, ainsi que le guide pratique Geosipol de 2012 (Geosipol, 2012), expliquant les différents cas pratiques d'utilisation de la géostatistique ; la nouvelle méthodologie nationale de 2017, qui régleme nte l'utilisation de la géostatistique ; le rapport RECORD de février 2013 de Jeannee et al (Record, 2013), qui résume l'évolution de la perception de la géostatistique en France entre 1998 et 2013, et des axes d'amélioration de cet outil, du point de vue des bureaux d'études en 2013 ; des documents relatant le retour d'expérience de l'application des méthodes de géostatistique comme les études de Finzgar et al., Cao et al., Guagliardi, I., et al., Jiao. et al.

Enquête :

A l'issue de l'état de l'art, une enquête a été menée dans le but de connaître l'avis de professionnels de bureaux d'études et d'en tirer des conclusions. L'enquête a été administrée sur plusieurs bureaux d'études à travers la France afin de compléter l'étude faisant l'objet de ce mémoire.

Cette enquête repose sur un questionnaire anonyme de 18 questions. Ce questionnaire est reproduit en Annexes. Il a été bâti de façon à pouvoir comprendre, en fonction du type d'acteurs répondant, quelle est son utilisation de la géostatistique (expertise interne, sous-traitance, plan de gestion, ...), sa connaissance de l'outil, 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.

Le questionnaire a été transmis en français, via la base de données des membres de l'UICE (L'Union des Consultants et Ingénieurs en Environnement), via des contacts obtenus par téléphone aux bureaux d'études ou sur le site de LinkedIn.

Les résultats et l'analyse de cette enquête pourront être comparés à ceux du rapport Record 2013 (Record, 2013), afin de voir l'évolution qu'il y a eu entre 2013 et 2018 (5 ans plus tard).

II. Les incertitudes liées aux diagnostics des sites et sols pollués

Les études de risques sanitaires en sites et sols pollués (SSP) comportent des diagnostics de site. Ces diagnostics SSP sont des actions mises en place dans le but d'obtenir, d'organiser et d'interpréter des informations ou des données spécifiques aux SSP et représentatives du contexte local. Ils doivent permettre de connaître l'état des milieux et de décrire les enjeux sanitaires et environnementaux en s'appuyant sur des moyens proportionnés et adaptés afin de sélectionner des mesures de gestion adéquates aux SSP et aux milieux environnants (MEDD, 2007).

Ainsi les études de diagnostic à effectuer auront, la vocation de répondre à des objectifs divers que sont la localisation et la quantification de pollutions dans des milieux différents (sols, eaux souterraines, ...) en vue de caractériser des sources de pollutions (diffuses et concentrées), des milieux d'exposition (MEEM, 2017a).

Ces diagnostics effectués dans la gestion des SSP ainsi que les démarches associées sont à l'origine d'incertitudes. Ces incertitudes influencent les résultats des diagnostics, et donc la détermination précise ou exacte de la pollution d'un site ou sol pollué ainsi que les risques et mesures de gestion attribués au site.

A. Les incertitudes

Les incertitudes sont définies le plus souvent comme le manque d'informations sur une situation, un phénomène ou une donnée. Le rapport Record de 2014 de De Giudici recense deux types d'incertitudes générales rencontrées lors des études de risques sanitaires en sites et sols pollués (Record, 2014).

En premier lieu, l'incertitude dite "épistémique ou épistémologique" qui serait liée intégralement à la connaissance. Elle serait exprimée par la connaissance incomplète d'une donnée présentant une valeur unique inconnue, dont la connaissance peut être améliorée (incertitude réductible) par des observations ou recherches supplémentaires. Comme exemple de ce type d'incertitudes : les échantillonnages de sol et les erreurs liées aux instruments de mesures, une étude historique insuffisante (Record, 2014).

D'après l'US-EPA (US-EPA, 2011), ces incertitudes épistémiques ont comme sources :

- les incertitudes de scénario (erreurs de description, d'agrégation, de jugement professionnel) ;
- les incertitudes de paramètre (erreurs de mesures, d'échantillonnage, utilisation de valeurs de remplacement par défaut, la mauvaise qualité des informations utilisées

pour définir un paramètre, la non-représentativité vis-à-vis de certains critères, le jugement d'expert) ;

- les incertitudes de modélisation (les incertitudes des relations causales, les représentations trop simplifiées de la réalité, le manque d'exhaustivité, lié à la non-inclusion de certaines variables pertinentes, l'utilisation de valeurs de remplacement pour des variables ne pouvant être mesurées, la non-prise en compte de facteurs augmentant la probabilité de survenue simultanée de plusieurs événements indépendants, le mode de compartimentation utilisée dans le modèle).

En second lieu, l'incertitude appelée variabilité, qui serait liée à la diversité des populations humaines ou l'hétérogénéité du milieu naturel (Haynes, 2011). Il s'agit d'une contrainte inévitable du monde réel. Ce type d'incertitude encore aussi appelé "incertitude irréductible", "variabilité aléatoire" ou encore "incertitude de type A" ne peut être réduit (Record, 2013).

D'après l'US-EPA (US-EPA, 2011), les incertitudes de type variabilité ont pour sources :

- la variabilité spatiale (selon la localisation: concentrations géochimiques naturelles etc) ;
- la variabilité temporelle (selon le temps: variation circadienne de concentration de pollution due aux transports etc) ;
- la variabilité intra-individuelle (selon un même organisme: variation physiologique en fonction de l'âge etc) ;
- la variabilité interindividuelle (selon les individus d'une population: variation des caractéristiques génétiques etc).

Ces deux types d'incertitudes ont été redéfinis en trois classes en fonction de leurs sources pour la caractérisation des SSP (Record, 2014).

B. Les incertitudes dans le cadre de la caractérisation des SSP

1. Les incertitudes de la caractérisation des SSP

Dans le cadre de la caractérisation des SSP, l'incertitude épistémique et l'incertitude de type variabilité ont été séparées en trois classes (Record, 2014).

La **variabilité**, qui représente l'incertitude de type variabilité toujours non réduite, peut être décrite par une distribution statistique construite à partir d'un échantillon de la population des valeurs possibles comme variabilité géologique (sols hétérogènes, variabilité spatiale des sols, variations des nappes souterraines) (Record, 2014) ;

L'erreur humaine ou technologique, représentant l'incertitude épistémique, est commise dans les analyses de laboratoire, dans les mesures physiques ou chimiques, dans le report des données, dans la géolocalisation et au niveau des prélèvements d'échantillons. Ces erreurs sont quantifiables en amplitude par des techniques adaptées. L'erreur humaine ou technologique peut avoir des effets sur la bonne caractérisation du phénomène de pollution. Elle peut être réduite en suivant les normes, guides et bonnes pratiques (Record, 2014).

L'ignorance, appartenant aussi à l'incertitude épistémique, s'applique à des phénomènes encore méconnus, à l'absence d'informations sur les activités d'un site, et à l'impossibilité de mesurer de façon précise les valeurs de certains paramètres. Ces incertitudes peuvent être réduites par multiplication du nombre d'échantillons prélevés, par des modèles géostatistiques pour les sols, des retours d'expérience ou des jugements d'experts etc (Record, 2014).

Les incertitudes épistémiques de types ignorance et erreur humaine sont les plus rencontrées dans un diagnostic de site. La variabilité dépend principalement de l'hétérogénéité des remblais présents sur les sites.

2. Les étapes de la caractérisation des SSP où sont retrouvées les incertitudes

Ces incertitudes sont donc retrouvées dans les différentes étapes de la caractérisation des SSP, à savoir:

- l'étude documentaire: exhaustivité de l'historique du site (documents relatifs aux procédés industriels, aux matières premières, réactifs, déchets, aux pratiques environnementales, incidents, accidents, etc.);
- les diagnostics pour la réalisation des études environnementales (stratégie et plan d'échantillonnages des sols, échantillonnages, investigations, etc.);
- les analyses sur les milieux : évaluation des expositions (paramètres d'exposition, modèles de transferts et paramètres d'entrée associés, etc.), et par conséquent l'évaluation des risques;
- les études de faisabilité et de dimensionnement, le suivi des travaux, leur contrôle et leur réception;
- la surveillance de la qualité des milieux.

Ces différentes étapes sont réparties dans les phases d'un diagnostic SSP ou d'une réhabilitation, définies par le référentiel de certification LNE (Laboratoire Nationale de métrologie et d'Essais) d'SSP à travers la norme NFX31-620, notamment :

- lors d'une évaluation ou un audit environnemental des sols (Eval 1 (étude historique, visite de site, étude documentaire, étude de vulnérabilité), 2 (CPIS (Conception de Programmes d'investigation ou de surveillance)), 3 (Evaluation des impacts et des enjeux)) ;
- lors d'une CPIS (Conception de Programmes d'investigation ou de surveillance) ;
- lors d'un Plan de Gestion pour une réhabilitation ou un aménagement de site ;
- lors d'une IEM ou Interprétation de l'état des milieux ;
- lors d'une Levée de doute (LEVE) pour savoir si le site relève ou non de la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués ;
- lors d'investigations complémentaires dans le cadre d'une réhabilitation ;
- lors d'études de projet pour le dimensionnement de la solution de gestion retenue.

Ces incertitudes vues précédemment peuvent être quantifiables ou qualifiables selon les différentes étapes. Il est important que les différents opérateurs intervenant dans les études les mentionnent et les décrivent, de même que leurs conséquences techniques et financières et leurs moyens de réduction (MEEM, 2017b).

Les incertitudes peuvent être évaluées et définies selon leur niveau d'importance. Leur évaluation dans le rapport Record de 2014 (Record, 2014) a montré que parmi celles ayant obtenues une cotation très élevée dans la gestion des sites et sols pollués, figurent les incertitudes liées aux échantillonnages des sols.

C. Identification des incertitudes liées aux échantillonnages du milieu sol des sites et sols pollués

1. Les incertitudes en échantillonnage des sols

Les sols échantillonnés, sont constitués de sols hétérogènes à l'état naturel qui ont subi des pollutions liées aux activités du site, aux remblais composés de matériaux solides amenés sur le site pour des besoins de nivellement, aux déchets solides comparés à des matériaux présents sur le site lors du diagnostic (cendres, mâchefers, scories etc). Les campagnes d'échantillonnage de sol sont généralement réalisées sur la base :

- d'études historiques,

- de plans de sites (anciens ou nouveaux),
- de résultats d'investigations antérieurs, et caractéristiques organoleptiques (aspect, couleur, odeur),
- de mesures de présence de composés volatils au détecteur par photoionisation ou PID (Photolonization Detector) des sols.

Les conditions de localisation, de prélèvement, de conditionnement, de traitement, de transport et de conservation de ces sols échantillonnés, leur volume et jusqu'à leur analyse sont des paramètres importants qui peuvent causer des incertitudes lors de l'échantillonnage.

Les incertitudes les plus importantes de l'échantillonnage en SSP sont de type ignorance (Record,2014). Leur amplitude ou "écart entre les concentrations prélevées et les concentrations extrêmes existantes sur un site peut varier d'un facteur supérieur à 100 pour les éléments de traces métalliques (ETM) par exemple et d'un facteur quasi infini pour les polluants non naturellement présents dans les sols".

Ces facteurs influencent les incertitudes de type ignorance et sont causés par les paramètres, vus précédemment, à savoir le flaconnage, la taille et la profondeur du sondage par rapport au site (la possibilité de s'éloigner ou de passer à côté de la pollution dans le sol dans le cas où le sondage n'atteint pas la nappe), la lithologie (ou type de sol pouvant facilement ou non diffuser la pollution), les indices organoleptiques (le sol ne sent rien, mais la mesure au PID peut indiquer une forte concentration de COV (Composés Organiques Volatils), où les analyses au laboratoire peuvent révéler une forte pollution), le nombre de sondages (selon qu'il soit insuffisant pour obtenir assez de données sur la pollution réelle du site).

2. Les enjeux de ces incertitudes

Ces incertitudes ont des conséquences sur les plans financier et sanitaire. Sur le plan sanitaire, la non-réduction de ces incertitudes conduit à une mauvaise évaluation des risques qui se traduirait :

- soit par « une tendance à sous-estimer le risque avec l'utilisation de la concentration maximale (principe de précaution), faisant que tout nouvel échantillon augmente la valeur représentative, de sorte que si sa concentration n'est pas supérieure aux autres, elle ne sera pas prise en compte » (Record, 2014);

- soit par « une tendance à surestimer l'exposition avec l'utilisation d'une valeur statistique afin que les échantillons présentant une valeur à la concentration maximale soient pris en compte » (Record, 2014).

Ainsi la source d'incertitudes en termes d'échantillonnage des sols en SSP est qualifiée de "site-dépendante".

Sur le plan financier, ces incertitudes mèneraient à une mauvaise estimation des volumes de terres polluées. En effet, lors d'une contamination du sol, les polluants en raison des différentes interférences physiques, chimiques ou biologiques du sol, peuvent être moins concentrés au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source de pollution. (Record, 2014). Ce qui conduirait à des gradients de concentrations très élevés.

Ces paramètres sont la cause de volumes d'investigation de sol assez conséquents. Il est donc primordial, de bien choisir la stratégie d'échantillonnages, car ces volumes de sols conséquents entraînent une augmentation du nombre d'échantillons pouvant s'avérer très coûteuse et dépasser le budget initial alloué aux investigations (MEDD, 2007).

De même que ceci pourrait avoir une répercussion sur le budget destiné à la dépollution. Le coût de l'élimination des terres polluées en décharge pourrait être doublé voir excessif, sachant que les coûts de traitement sont de l'ordre de 70 à 500€/t (hors taxes et hors TGAP (Taxe Générale sur les Activités Polluantes), coûts d'excavation et de transport non compris) en ISDD (Installation de Stockage de Déchets Dangereux), de 50 à 90€/t (hors taxes et hors TGAP, coûts d'excavation et de transport non compris) en ISDN (Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux), de 3 à 25€/t (hors taxes et hors TGAP, coûts d'excavation et de transport non compris) en ISDI (Installation de Stockage de Déchets Inertes) (SélecDépol, 2016).

3. Les moyens de réductions de ces incertitudes

Les incertitudes liées aux échantillonnages des sols peuvent être réduites considérablement par l'intermédiaire d'un plan d'échantillonnage. Leur amplitude peut être diminuée d'un facteur 100 à un facteur -10 pour les ETM, si le plan d'échantillonnage est basé sur des valeurs maximales de concentration. Cependant pour que le plan d'échantillonnage soit efficace, il faut que les stratégies d'échantillonnages soient adéquates et tiennent compte de leur objectif : le type de diagnostic (initial ou complémentaire), les études documentaire, historique et visites du site (montrant la

connaissance du site), les contraintes financières (selon le nombre d'échantillons et leur coût) (Record, 2014).

L'amplitude des incertitudes peut également être réduite jusqu'à un facteur inférieur à -100 (pour les ETM) si le plan d'échantillonnage est basé sur un indicateur statistique comme la géostatistique. Certaines méthodes géostatistiques appliquées à travers des logiciels spécialisés peuvent théoriquement améliorer les plans d'échantillonnages systématiques. (MEDD, 2007a).

La mise en application des normes spécifiques à ces pratiques permet de contrôler ces incertitudes de façon significative. Ainsi les incertitudes liées à l'échantillonnage des sols sont essentiellement de type épistémique, car leur réduction nécessite une augmentation du nombre d'échantillons. Seulement, cette augmentation comme il est dit précédemment, étant souvent confrontée à un problème de budget, devra se faire en adéquation avec le plan d'échantillonnage (Record, 2014).

En somme, les incertitudes de type ignorance liées aux échantillonnages de sol peuvent être réduites, non seulement par le suivi des normes, guides et bonnes pratiques, mais aussi par l'augmentation du nombre de sondages en fonction du budget du plan d'échantillonnage et par une méthode appelée Géostatistique. Cette étude s'est ensuite focalisée sur la géostatistique comme outil de réduction des incertitudes en échantillonnages des SSP, afin de connaître son fonctionnement et son efficacité.

III. Géostatistiques appliquées aux échantillonnages des sites et sols pollués dans la réduction des incertitudes

A. Présentation de la géostatistique et ses concepts

1. Définitions

La géostatistique est utilisée dans le domaine des SSP depuis une vingtaine d'années. Intégrée dans la méthodologie nationale de gestion des SSP depuis 2017, elle contribue désormais à fournir des moyens techniques dans le cadre d'un diagnostic de sol, d'un plan de gestion, d'une réhabilitation de site pollué afin de représenter une pollution dans l'espace et permettre une estimation de l'incertitude qui en est associée (Record, 2013).

La géostatistique fournit des conditions méthodologiques rigoureuses pour :

- cartographier les zones de pollution,
- estimer les volumes et tonnages de sols ou matériaux impactés,
- optimiser la densité et la localisation des investigations en fonction des informations reçues et du manque d'informations mise en évidence,
- rationaliser les budgets attribués à l'étude (stratégie et plan d'échantillonnage) (Lion F et al, 2016).

La géostatistique constitue un bon outil d'aide à la décision pour sa contribution dans la quantification des incertitudes affectant les modèles de distribution spatiale de la pollution et leur transfert à des modèles de risques financiers ou sanitaires. Contrairement à la statistique classique, la géostatistique prend en compte la localisation des données ; "elle désigne un ensemble de méthodes et un formalisme mathématique qui permettent de décrire quantitativement des phénomènes présentant une variabilité spatiale et/ou temporelle" (Record, 2013).

2. Objectifs

Le guide sur la pollution concentrée (UPDS, 2016) définit trois objectifs de la géostatistique :

- "la cartographie de la distribution des polluants dans l'espace ainsi que les incertitudes associées (liées à la variabilité spatiale des concentrations) ;

- le calcul et le positionnement dans l'espace, des volumes de sols dont la concentration estimée en polluants se situe au-dessus d'un seuil (déterminé par avance). Ce volume permettra d'estimer la masse de polluants correspondante ainsi que les incertitudes qui y sont associées ;
- l'optimisation de l'acquisition de données complémentaires réduisant les incertitudes associées aux objectifs fixés”.

Sur ces trois objectifs, s'appuie le mode de fonctionnement de la géostatistique.

3. Méthodes de fonctionnement de la géostatistique

L'analyse géostatistique peut se faire sur des concentrations en polluants issues de différentes matrices comme le sol, l'eau, les gaz du sol etc. Des informations comme la lithologie (issue des coupes des sondages), les données géophysiques ou mesures de terrain (PID, XRF, etc) permettent de contraindre le modèle géostatistique.

L'analyse géostatistique peut être divisée en trois étapes :

- L'analyse exploratoire,
- Le variogramme ou analyse de la variabilité spatiale ou analyse variographique,
- La représentation cartographique ou modélisation par utilisation du modèle de variogramme et du maillage.

La première étape, « l'analyse exploratoire » consiste en l'analyse des données issues de l'échantillonnage, par un plan de position ou localisation spatiale et un traitement ou une analyse statistique classique (voir figure 1) de ces données (histogramme, moyenne, fréquence, médiane etc), afin de déterminer des corrélations entre les données, des tendances spatiales, et l'existence d'éventuels biais grâce à une validation et une première interprétation des données.

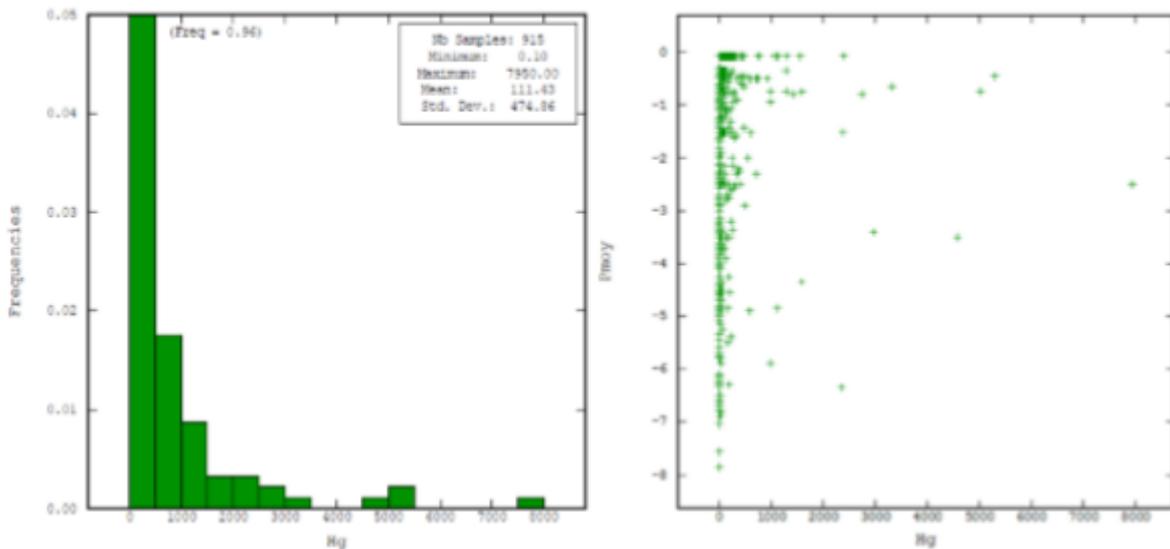


Figure 1: histogramme des données de mercure (Hg) (à gauche) et évolution des teneurs en mercure (Hg) avec la profondeur (à droite) (UPDS, 2016).

En seconde étape, le variogramme ou analyse variographique permet d'évaluer la variabilité des données selon la distance qui les sépare. On obtient alors un variogramme expérimental (mis en exemple en figure 2). Il permet d'obtenir une équation pour l'estimation des valeurs de concentrations en fonction de la localisation et de la distance aux points échantillonnés en ne tenant pas compte des éléments physiques pouvant influencer l'évolution de la pollution dans le sol.

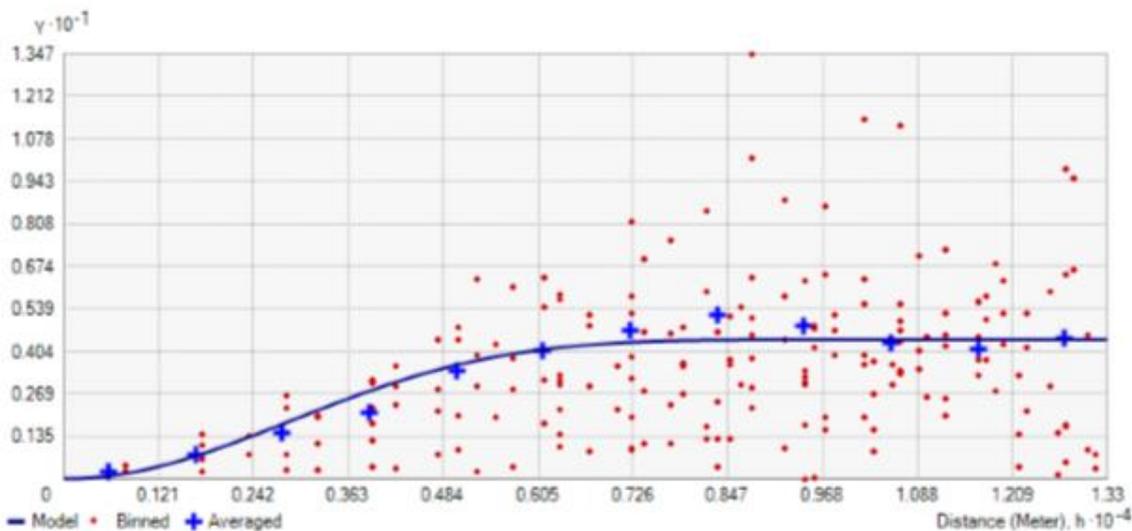


Figure 2: Exemple de variogramme expérimental (logiciel ArcGIS®) reprenant les valeurs des paires de points (rouge), leur moyenne (croix bleue) et le variogramme modélisé (ligne bleue) (Ocelli, 2014).

Enfin pour la dernière étape, le variogramme sera utilisé afin d'obtenir une cartographie de la pollution, grâce à deux types de modélisations :

- le krigeage ou interpolation par krigeage : il permet d'établir, à travers un modèle de variogramme sélectionné, une cartographie des concentrations, à partir de laquelle une carte des incertitudes peut-être estimée, par la méthode d'interpolation (voir figure 3). Le krigeage est un très bon estimateur linéaire sans biais. Il réduit le risque d'erreur en chaque point estimé mais ne permet pas de représenter la variabilité locale ou réelle.

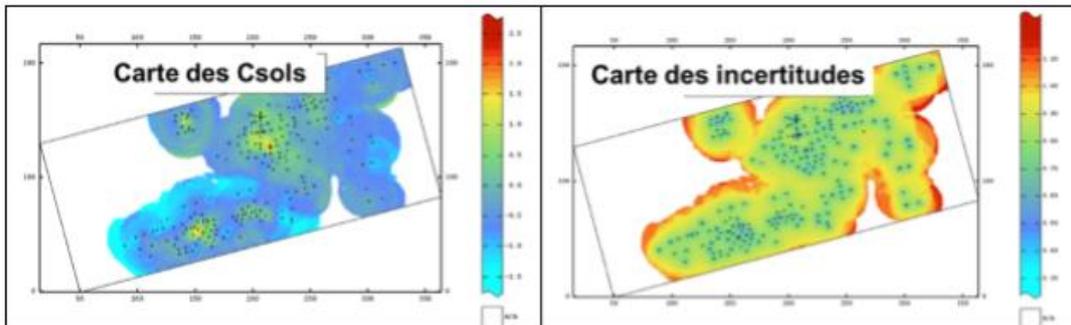


Figure 3: Cartes des concentrations dans les sols en solvants chlorés (échelle $\log[C]$, C en mg/kg MS): à gauche concentrations interpolées par krigeage et à droite, incertitudes liées au modèle de krigeage (UPDS, 2016).

- la simulation géostatistique : elle permet de fournir des images possibles du phénomène de pollution, en prenant en compte la distribution statistique (l'histogramme) et la structure ou variabilité spatiale (variogramme) des valeurs mesurées en chaque point de l'espace (Record, 2014). Un grand nombre de simulations est nécessaire afin d'obtenir des cartes de probabilité de dépassement de seuil critique dont on peut voir l'exemple dans la figure 4. Contrairement au krigeage qui montre l'image la plus probable, la simulation géostatistique reproduit toute la variabilité du phénomène étudié (Record, 2013).

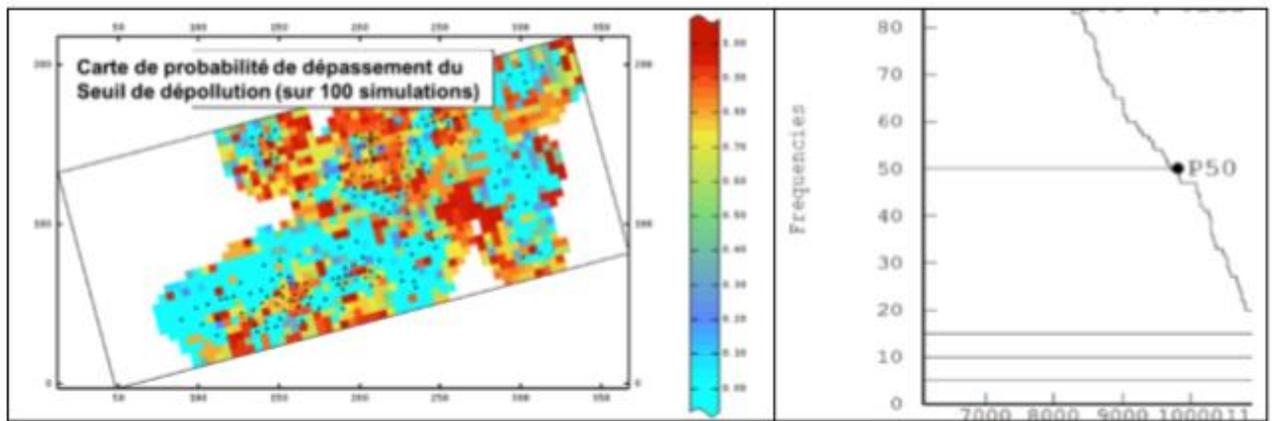


Figure 4: Carte de probabilité de dépassement du seuil de concentrations dans les sols en solvants chlorés (seuil retenu à 100 mg/kg MS, à gauche) et distribution statistique du volume de sol correspondant au dépassement (fréquences cumulées, à droite), (UPDS,2016).

Grâce à ces différentes méthodes, la géostatistique peut être appliquée à l'échantillonnage des SSP afin de réduire les incertitudes.

B. Différents domaines d'applications de la géostatistique dans l'échantillonnage des sites et sols pollués

La géostatistique peut probablement s'appliquer à toutes les différentes phases d'un diagnostic SSP comme le Plan de Gestion ou la conception d'un programme d'investigation ou de surveillance.

Comme exemple, dans l'étude de Finzgar (Finzgar et al, 2014), la géostatistique a été employée dans le cadre d'une réhabilitation des sols contaminés en plomb et en zinc. Dans la figure ci-dessous, on peut observer une cartographie de prédiction géostatistique avant et après la réhabilitation, pour montrer l'efficacité de la géostatistique.

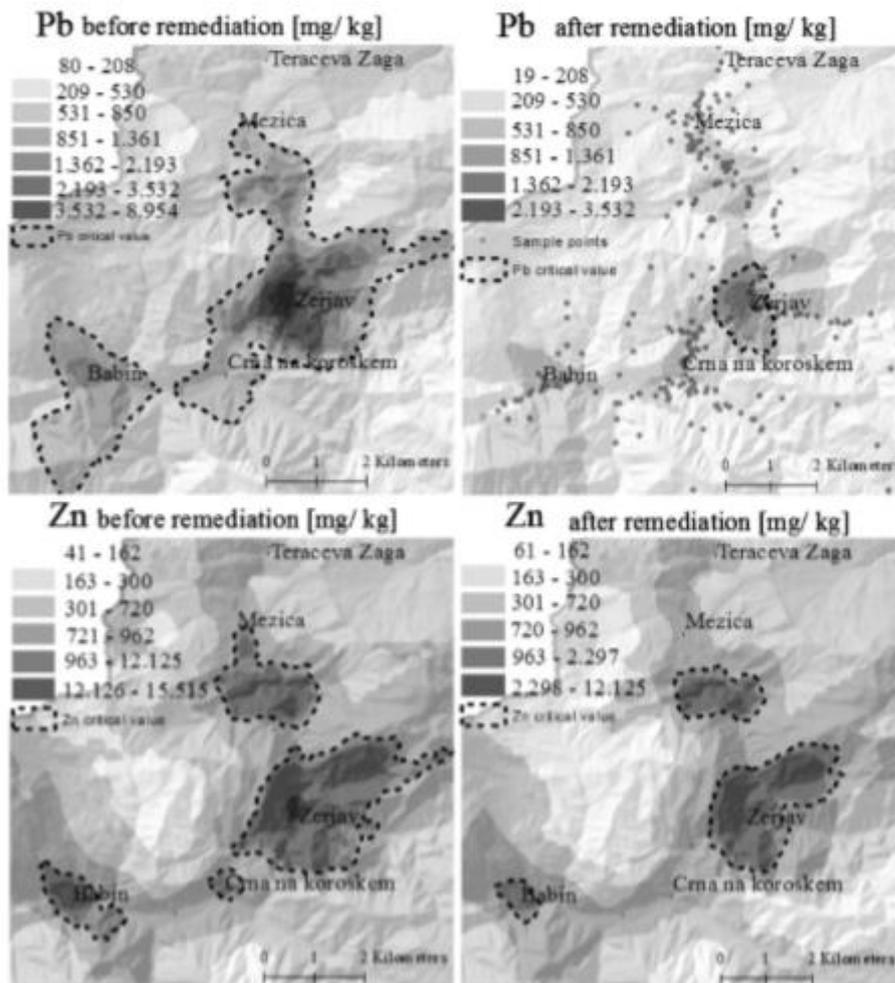


Figure 5: Cartographie des concentrations de Pb et de Zn dans les sols de la vallée du Meza avant et après les travaux d'assainissement, avec emplacement d'échantillonnage (en haut à droite) et zones présentant des concentrations critiques de Pb et de Zn indiquées par une ligne pointillée (Finzgar et al, 2014).

La géostatistique peut donc être appliquée aux différentes phases d'un diagnostic SSP. Il faudra donc en préciser les apports fournis par la géostatistique.

1. Apport de la géostatistique

Dans le cadre de l'échantillonnage des sols, la géostatistique aide à la réduction des incertitudes spatiales en apportant des outils et résultats permettant l'optimisation rigoureuse et systématique de la stratégie ou du programme d'échantillonnage (optimisation de la forme des mailles des plans d'échantillonnage systématiques (MEDD, 2007a), la quantification des incertitudes d'estimation, la prise en compte de corrélations spatiales ou entre variables, l'intégration de données hétérogènes ou de natures diverses,

la correction de biais d'échantillonnage, la validation ou mise à défaut des pratiques d'échantillonnage influant sur la qualité des estimations (Géosipol, 2005).

Les différents outils fournis par la géostatistique pouvant être utilisés dans l'échantillonnage des sols sont : la carte de variance krigage pour les zones d'incertitude d'estimation, la carte de probabilité de dépassement de seuils pour les zones dont la prise de décision pour un seuil donnée est liée à une forte incertitude (Record, 2013).

Comme exemple l'étude ci-dessous (Guagliardi, I., et al., 2015) effectuer une évaluation de la pollution en plomb (Pb) dans les sols du sud de l'Italie. Elle a permis d'évaluer l'utilité d'une approche géostatistique innovante pour calculer la probabilité du Pb de dépasser la valeur seuil critique imposée par le décret italien. L'approche proposée peut fournir une mesure de l'incertitude spatiale et définir des zones où la probabilité d'occurrence de valeurs supérieures à 100 mg / kg est supérieure. La carte de la concentration moyenne simulée de Pb et celle de la probabilité de dépasser une valeur réglementaire donnée pour la concentration de Pb dans le sol, élaborées avec le pack logiciel ISATIS, ont montré clairement une corrélation stricte entre l'emplacement des sources d'émission, les routes et les plus fortes concentrations de Pb (figure 6 et 7) :

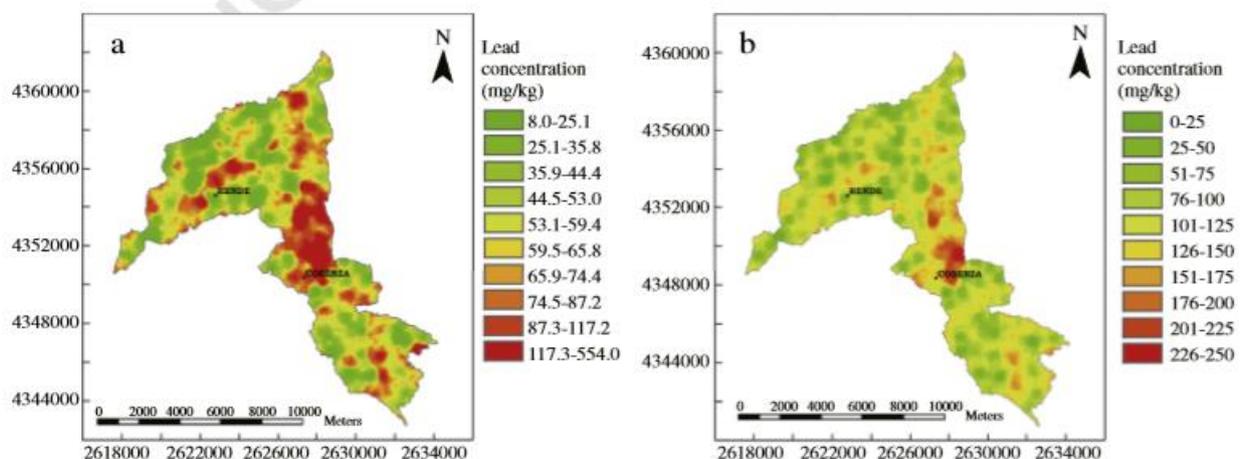


Figure 6: Cartes de la concentration moyenne de plomb dans le sol (a) et de l'écart type (b) obtenues par simulateur séquentiel gaussien (Guagliardi, I., et al., 2015).

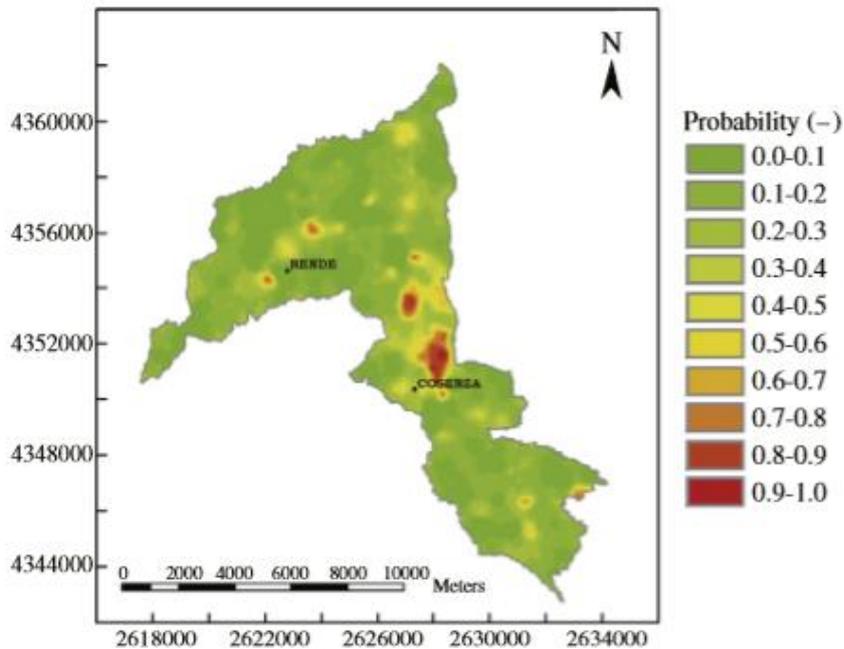


Figure 7: Carte de probabilité de dépassement du seuil de 100 mg / kg (Guagliardi, I., et al., 2015)..

D'après les auteurs, les valeurs d'échelle colorées représentent la probabilité de dépasser la valeur seuil spécifiée, mais surtout des estimations des concentrations de Pb dans le sol. Ils pensent qu'il existe une incertitude concernant la concentration réelle de Pb dans le sol, mais la probabilité que la concentration soit supérieure à 100 mg / kg est très élevée dans les zones rouges et, inversement, une telle occurrence est en fait impossible dans les zones vertes indiquées (Fig.7). (Guagliardi, I., et al., 2015).

Une autre étude (Jiao et al., 2013) effectuée sur le réservoir de Guanting à Beijing en Chine dans une zone industrielle située au coin du vent, dans le but d'étudier l'influence des activités humaines et des processus naturels sur la distribution des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans les sols, s'est basée sur une méthode d'interpolation géostatistique appelée Krigeage ordinaire. L'analyse spatiale a permis de montrer que les concentrations élevées de HAP étaient principalement distribuées près de la source ponctuelle dans la zone industrielle. (Jiao et al., 2013).

D'autres outils ont été développés, comme certains logiciels (R, surfer, ArcGis, SigmaPlot etc), qui sont parfois spécifiques aux différents bureaux d'études spécialisés en géostatistique.

De plus l'apport de la géostatistique dans les stratégies nécessite de remplir certaines conditions d'application et de tenir compte des limites de cet outil méthodologique.

2. Conditions d'Application et limites de la géostatistique

a) Conditions de mise en œuvre de la géostatistique appliquée à l'échantillonnage des sols

La géostatistique appliquée à l'échantillonnage des SSP, en plus de nécessiter des compétences en traitement des données et en utilisation de logiciels spécialisés, doit respecter certaines règles, notamment le nombre suffisant de données comme les valeurs de concentration pour chaque polluant.

Ainsi selon le degré d'hétérogénéité du site, il faudrait : au minimum 10 à 15 données pour renseigner une variable d'intérêt et procéder à une analyse exploratoire, plus de 20 données pour une étude variographique pouvant donner lieu à une cartographie et il est recommandé d'obtenir au moins 20 à 30 données pour une démarche de simulation ou de modélisation plus sophistiquée. L'homogénéité du site et l'homogénéité des échantillons du point de vue de leur volume, de leur géométrie, de leur mode de prélèvement et de leur traitement doit être garantie pour réduire les erreurs d'échantillonnages, l'étude historique et documentaire doit être prise en compte dans les mesures et analyses, (Record, 2014 ; Record, 2013).

b) Limites de la géostatistique appliquée à l'échantillonnage des sols

La géostatistique n'est pas indispensable dans une démarche de lever de doute, car le but est simplement de valider ou non l'existence hypothétique d'une source de pollution. Ce qui fait que les données produites ne sont en général pas suffisantes pour une étude géostatistique (Record, 2013 ; Record, 2014).

En effet, les méthodes géostatistiques, pour être efficaces, doivent s'appuyer sur un nombre de données assez conséquent, afin que ces données soient significatives dans le but d'effectuer une cartographie précise. Par ailleurs toutes ces données ne peuvent être produites que par une multiplication du nombre d'échantillons afin de mieux couvrir la surface du site, ce qui occasionne forcément une élévation des coûts de travaux.

De plus, lorsqu'il s'agit d'un site très hétérogène et très complexe comme les anciens sites industriels ayant connus beaucoup de remaniement de sol (avec des excavations, et

ajouts de terre), la géostatistique peut très difficilement établir des cartographies de la pollution qui soient plus significatives que celles obtenues par d'autres méthodes.

Néanmoins, ce type d'incertitudes (hétérogénéité des sols) est toujours mieux quantifié par la géostatistique et nécessite de s'appuyer sur une étude historique fiable qui conduirait probablement à la création de données complémentaires, engendrant des coûts supplémentaires.

Cependant la géostatistique ne peut répondre à l'ensemble des problèmes posés par la réhabilitation des sites pollués. Son application nécessite des compétences spécifiques et une bonne communication entre les différents protagonistes impliqués afin d'éviter d'obtenir des résultats insuffisants et inappropriés (Record, 2013).

Ainsi la géostatistique a pour rôle principal, « l'amélioration de la qualité de l'échantillonnage et donc du degré de confiance dans la représentativité des échantillons de sols » (Record, 2014) dès l'instant où elle est intégrée dans les campagnes d'échantillonnage des sols ou la conception des études. Les différents modèles géostatistiques ont une capacité d'adaptation spécifique aux estimations de risque sanitaire à condition d'effectuer un certain travail de développement rigoureux.

En outre, il existe une multitude de méthodes d'interpolation possible, par exemple les différents types de krigeage, montrant chacun un résultat différent. Ces outils sont bien complexes et donc parfois difficiles à utiliser par les bureaux d'études, notamment par les ingénieurs non formés. Il faut avant tout bien maîtriser les notions de statistiques et de statistiques spatiales. Le risque est clairement de générer une carte erronée.

Comme exemple de l'importance du choix des outils fournis par la géostatistique, l'étude de Cao et al (Cao et al, 2016). Elle a prouvé la nécessité d'introduire des co-variables dans les modèles de krigeage du cadmium (Cd) des sols, car celui-ci est extrêmement influencé par les activités anthropiques. Cette influence fait que son autocorrélation spatiale est de nature assez faible, ce qui est peu recommandé pour une approche de la géostatistique par krigeage. D'où ce besoin d'amélioration de la précision de ces modèles d'interpolation du Cd. Les résultats de l'utilisation de ces modèles sont représentés dans la figure ci-dessous :

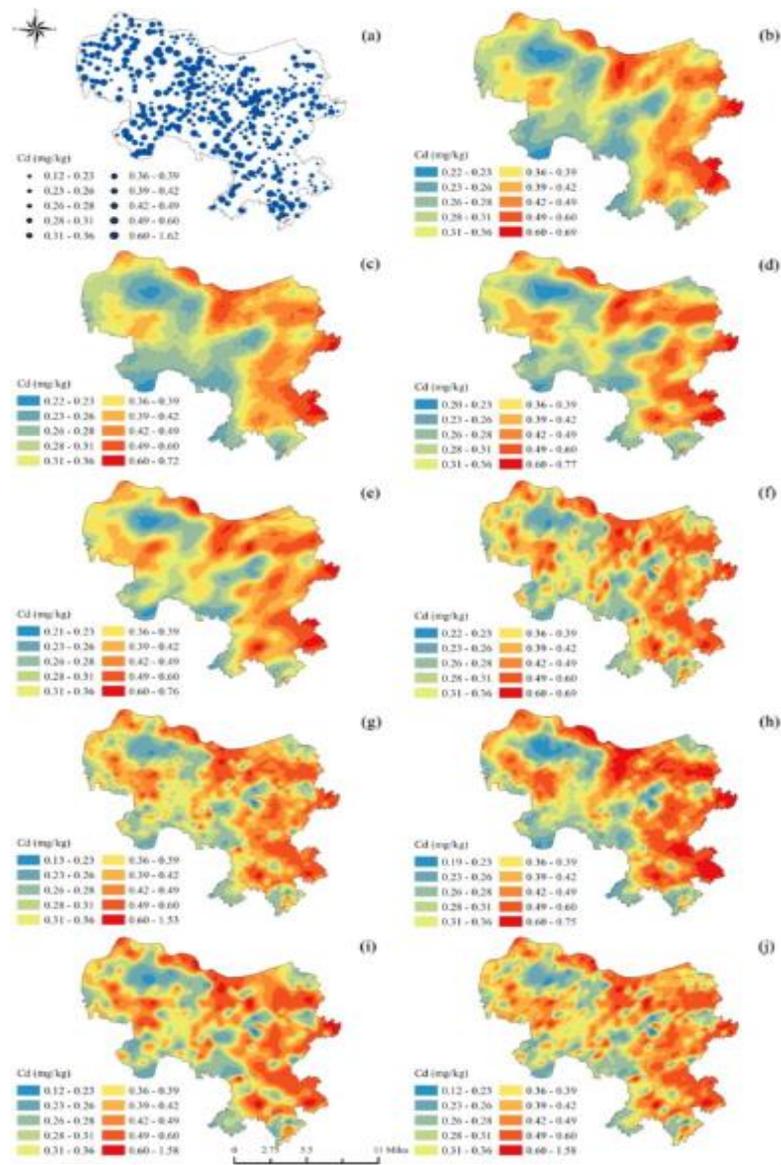


Figure 8: Cartes de la teneur en Cd dans les sols des échantillonnages (a) et estimations de la teneur en Cd dans les sols utilisant le krigeage ordinaire OK (b), RK (Regression Kriging) avec combinaison de l'élévation variable auxiliaire (c), de la pente (d), TWI (e) distance par rapport à la zone résidentielle (f), types d'utilisation du sol (g), types de sol (h), toutes les variables auxiliaires quantitatives (i) et toutes les variables auxiliaires (j) (Cao et al,2016).

La méthode RK (Regression Kriging) a permis de saisir les tendances générales et la variabilité locale du Cd dans les sols, alors que la méthode OK (Ordinary Krigeage) ne tenait compte que des variations spatiales des points de prélèvement. La méthode RK représentait donc un modèle d'interpolation spatiale plus optimisé que la méthode OK, pour la cartographie prédictive du Cd dans les sols, lorsque la structure spatiale ne pouvait pas être correctement capturée par des points d'échantillonnage, ou dans les cas où il

existe une relation forte entre la variable cible et les variables auxiliaires (Kravchenko and Robertson, 2007).

Ces résultats ont montré que le choix des bons outils de la géostatistique, à savoir les méthodes appropriées d'interpolation et les bonnes variables, est très important dans l'élaboration d'une étude géostatistique fiable, précise et d'une bonne représentation spatiale.

Ainsi la bonne connaissance des données d'entrée issues de l'analyse exploratoire, et de l'étude historique conditionne une meilleure estimation de la variabilité spatiale de la pollution, et donc une meilleure précision de l'étude géostatistique.

Actuellement la géostatistique semble encore très peu appliquée à l'échantillonnage des sols, mais elle peut représenter « un moyen coût-efficace » de réduction des incertitudes des études sanitaires relatives aux SSP » (Record, 2014).

La géostatistique comporte de très nombreuses limites à son utilisation, bien qu'étant un outil d'aide à la décision très important en SSP. Sa perception par les ingénieurs avant que l'enquête de ce mémoire ne soit effectuée permettra de comprendre son évolution jusqu'à nos jours.

C. Perception de la géostatistique ces 15 dernières années (jusqu'à 2013).

L'enquête réalisée en 2013 (Record, 2013) sur la perception de la géostatistique a permis de savoir de quelle façon les ingénieurs des bureaux d'études ont perçu et utilisé la géostatistique en France, entre les années 1999 et 2013. Elle est essentiellement vue comme un outil d'aide à la décision important lors du diagnostic de sites pollués. Elle est utilisée dans l'amélioration de la compréhension de la pollution en place, la cartographie des milieux contaminés, l'estimation des volumes et tonnages de matériaux contaminés, la quantification des incertitudes associées à ces volumes et l'optimisation des stratégies d'échantillonnage.

Jusqu'en 2013, les différents types d'informations sur la pollution (mesures sur site ou mesures géophysiques etc) ne sont toujours pas intégrés dans la méthodologie, et sont très rarement mis en pratique. De plus l'utilisation de la géostatistique nécessite certaines compétences spécifiques, et une connaissance de ses concepts de base. Il en ressort

donc : un besoin de communication entre le géostatisticien, l'ingénieur chargé du diagnostic, le donneur d'ordre et l'autorité réglementaire ; une bonne formation de ces ingénieurs et une sensibilisation des acteurs en contact avec ce type d'études pour l'amélioration et la réussite de ces études géostatistiques.

Il est aussi noté une certaine déception des ingénieurs dues à la différence entre les résultats obtenus et les objectifs attendus après l'utilisation d'une étude géostatistique. Ceci serait dû à un défaut de mise en application de cet outil, et à la nécessité d'intégrer la géostatistique et ses conditions de mise en œuvre dans les guides méthodologiques utilisés. Cette intégration renforcée par des cas réels et démonstratifs de la pertinence des études statistiques permettraient de faciliter leur application et leur recours par les acteurs en SSP (Record, 2013).

IV. Questionnaire et analyse de la situation actuelle

A. 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 dans la partie suivante. Comme dit précédemment dans la méthodologie, le questionnaire de l'enquête est exposé dans la partie Annexes de ce document.

1. Typologie des réponses reçues

A l'issue de l'enquête, 22 réponses (présentées en Annexes) sont parvenues de la part de professionnels du secteur des SSP qui ont été confrontés ou non à des études géostatistiques en France. La moitié des réponses sont celles d'acteurs n'ayant jamais été confrontés à ce type d'études.

Parmi les 22 réponses synthétisées, 36,4% des personnes ayant répondu sont des responsables d'agence, dirigeants, PDG et directeur, 31,8% des répondants sont dans la catégorie chargée d'études, stagiaire, ingénieur d'études, 18,2% sont des ingénieurs projet et chargés de projet, et les 13,6% restant sont des chefs de projet, superviseurs ou spécialistes en SSP. Une attention particulière sera néanmoins accordée aux réponses émanant d'ingénieurs d'études et de projet, de chargé d'études et de responsables qui détaillent la situation au niveau de leur bureau d'études et qui ont déjà été confrontés à la géostatistique.

2. Domaine des bureaux d'études des différents acteurs

Les participants ont répondu à la question : « En quoi est spécialisé votre bureau d'études en termes d'SSP ? ».

Les domaines dans lesquels sont spécialisés les différents acteurs, ont été définis en fonction de ceux donnés par la norme NFX 31-620, avec : le domaine A (Prestation, études, assistance et de contrôle), le domaine B (Ingénierie des travaux de réhabilitation), le domaine C (Exécution des travaux de dépollution : assainissement, réhabilitation). Un autre domaine a été rajouté, celui de la recherche et ou formation ou domaine D. Les acteurs pouvaient rajouter un autre type de domaine, dans le cas où ils n'étaient pas représentés par les domaines déjà présentés, il s'en suit donc un ajout du domaine E

(Expertise et Tierce-expertise de dossiers SSP et Hydrogéologie), et du domaine Maître d'ouvrage industriel. On obtient donc comme répartition que :

- 8 des acteurs sont spécialisés dans le domaine A (Prestation, études, assistance et de contrôle) ;
- 8 sont spécialisés dans les domaines A et B (Ingénierie des travaux de réhabilitation) ;
- Un des acteurs est spécialisé dans les domaines A et C (Exécution des travaux de dépollution : assainissement, réhabilitation) à la fois ;
- Deux des acteurs sont spécialisés dans les domaines A et D (Recherche et ou formation) ;
- Un des acteurs est spécialisé dans 3 domaines à la fois : A, B et D ;
- Un sont des acteurs a rajouté le domaine Expertise et Tierce-expertise de dossiers SSP et Hydrogéologie ;
- Un des acteurs représente la profession de Maître d'ouvrage industriel.

Les domaines B, C et D ne sont donc pas représentés respectivement sans être associés au domaine A.

3. Tranche d'âge des participants

Les participants ont été questionnés sur leur tranche d'âge par la question : « A quelle tranche d'âge appartenez-vous ? ». Cette tranche d'âge des participants est représentée par le graphe ci-dessous :

TRANCHE D'ÂGE DES PARTICIPANTS

■ -30 ans ■ 30-40 ans ■ 40-50 ans ■ +50 ans

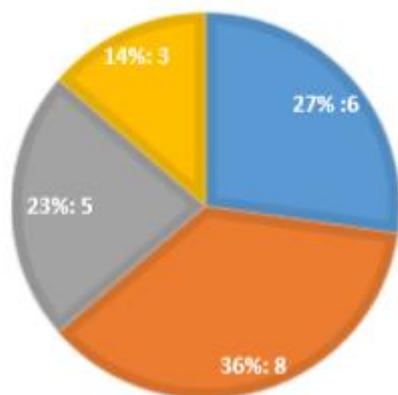


Figure 9: Tranches d'âge des participants lors de l'enquête.

D'après le graphique représentant la tranche d'âge des participants, les 30-40 ans sont le plus représentés avec un pourcentage de 36%. Ensuite viennent les moins de 30 ans avec un pourcentage de 27%. La tranche d'âge de 40-50 ans contient 23% des acteurs et les plus de 50 ans représentent tous deux chacune 14%. Ainsi la plupart des acteurs représentant le domaine des SSP ont environ entre -30 ans à 50 ans.

4. Utilisation de l'outil de géostatistique

a) Utilisation de l'outil

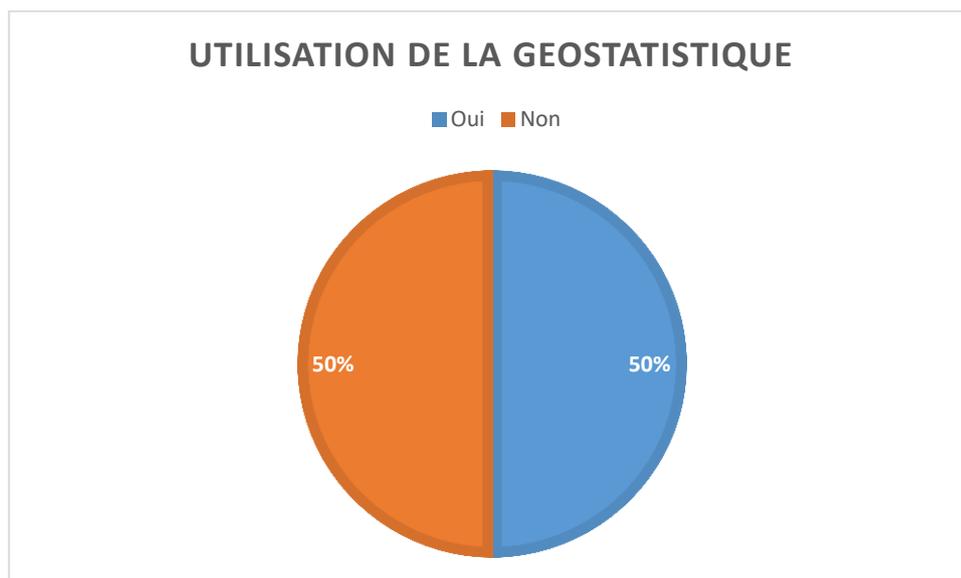


Figure 10: Pourcentage de participants utilisant la géostatistique.

50% des acteurs utilisent l'outil géostatistique et l'autre moitié semble ne pas l'utiliser, d'après les réponses à la question : « Utilisez-vous l'outil géostatistique » présentés en figure 8 ci-dessus. Le point suivant explique les raisons de son utilisation ou de sa non utilisation.

b) Raisons de l'utilisation de l'outil géostatistique

Les raisons d'utilisation de l'outil géostatistique sont diverses et variées. Les 11 répondants utilisant l'outil géostatistique sont répartis de la sorte :

- 45,5% l'utilisent dans le dimensionnement des sources de pollution, la cartographie des zones polluées, les cartes piézométriques et la modélisation des pollutions,
- 36,4% l'utilisent pour le calcul ou les statistiques de volumes de terres polluées (bilan massique), la représentation, représentativité, interprétation et graphique des résultats ou données,
- 18,2% pour la réalisation de plans d'échantillonnage, la préparation de l'échantillonnage par screening
- Un seul est spécialiste dans le domaine de la géostatistique
- Deux acteurs l'utilisent respectivement pour la validation de rapport (outil d'aide à la décision) et l'affinement des coûts de travaux de dépollution dans le cadre d'excavation de sols.

Les raisons de la non utilisation de l'outil géostatistique par les 11 autres répondants sont les suivantes :

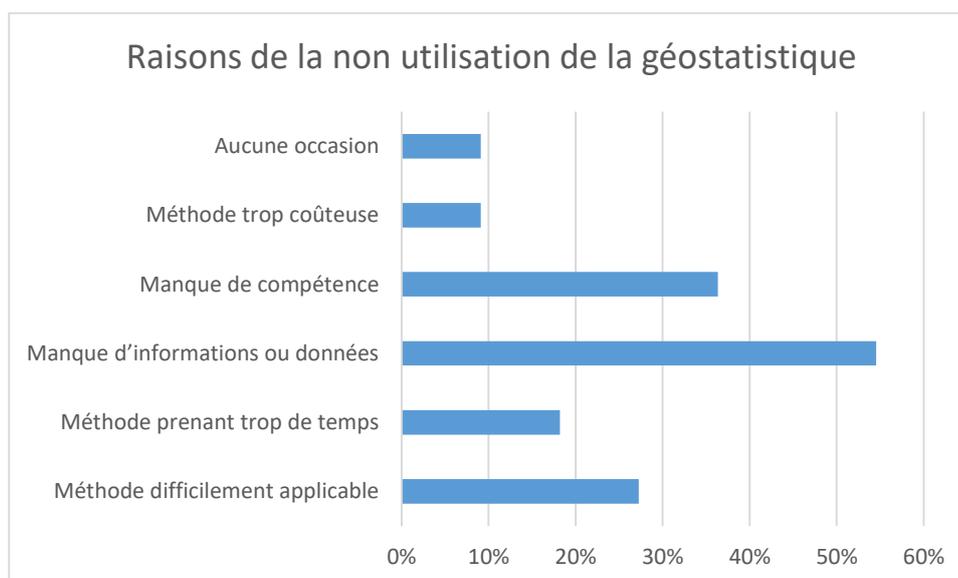


Figure 11: Graphique présentant la non-utilisation de la géostatistique.

La raison principale de la non-utilisation de la géostatistique par les différents acteurs est le manque d'informations ou de données. Ceux-ci ne possèdent en général pas suffisamment de données lors de leurs investigations pour effectuer une étude géostatistique. Car la plupart des acteurs interrogés effectuent en particulier des prestations du domaine A avec un premier diagnostic pour connaître l'état environnemental du site. La géostatistique ne sera donc pas appliquée sur les petits sites comme un petit garage par exemple, mais plutôt sur de gros sites à grande surface comme des sites industriels.

La seconde raison est le manque de compétence, reflétant la quasi absence de formation à la géostatistique. La difficulté et le temps de mise en application de la méthode géostatistique constituent aussi une raison de sa non-utilisation. En effet, ces deux derniers paramètres (difficulté et temps de mise en application) peuvent développer des réticences à l'utilisation de la géostatistique, car ils peuvent nuire à la productivité de l'ingénieur en bureaux d'études.

c) La fréquence d'utilisation de l'outil géostatistique

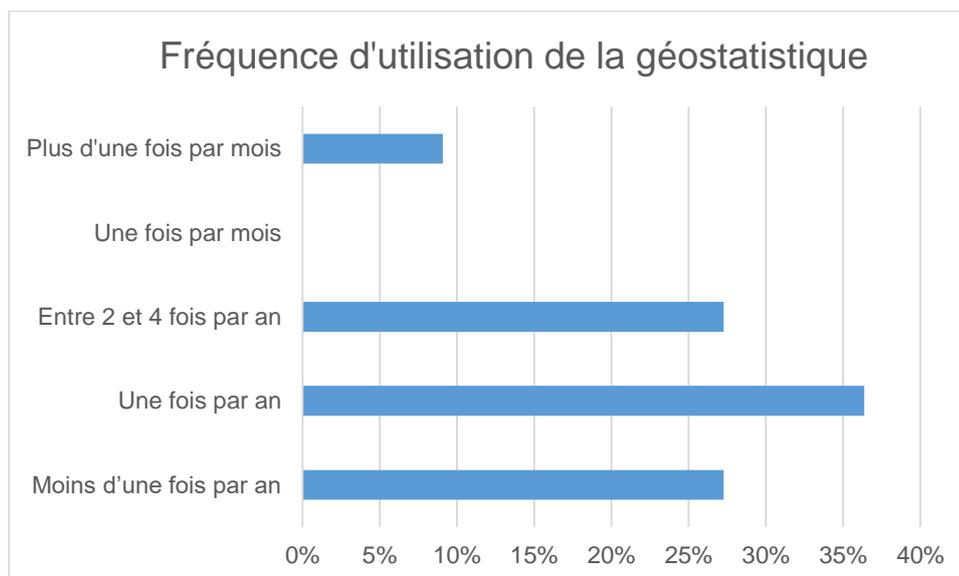


Figure 12: Graphique sur la fréquence d'utilisation de la géostatistique en bureau d'études SSP.

36% des acteurs utilisent l'outil géostatistique une fois par année, et 27% l'utilisent entre 2 et 4 fois par an ou moins d'une fois par an. Ces résultats semblent montrer que l'outil géostatistique n'est pas très souvent utilisé en bureau d'études.

d) Cadre d'utilisation de l'outil géostatistique

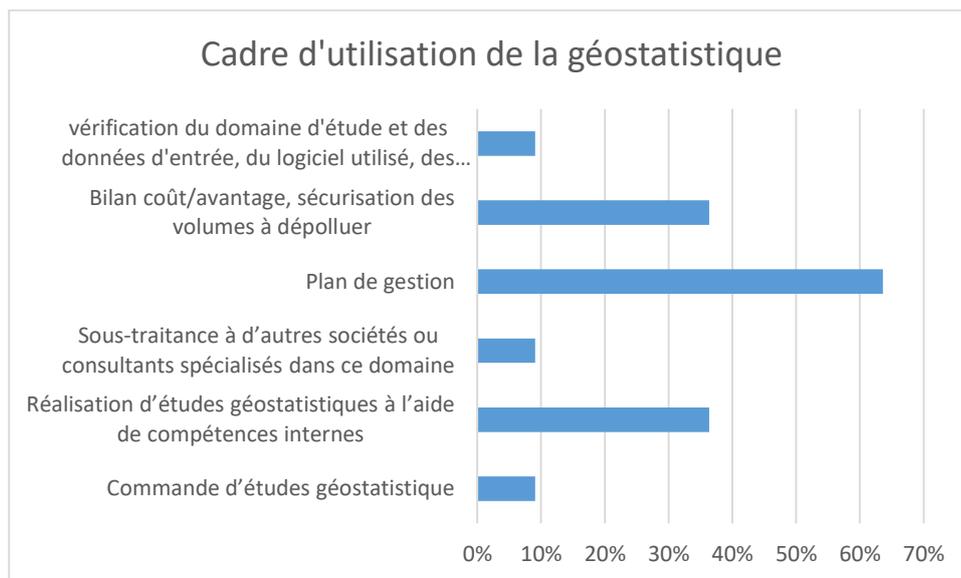


Figure 13: Graphique représentant le contexte d'utilisation de la géostatistique.

Le graphique ci-dessus montre que l'outil géostatistique est souvent utilisé dans le cadre d'un plan de gestion, avec un taux de réponses des acteurs de 64%. Les plans de gestion sont souvent élaborés par les bureaux d'études spécialisées dans le domaine A vu précédemment (prestations, études, assistance et contrôle). Un autre contexte ayant obtenu environ 36% de réponses de la part des acteurs, est à l'origine de l'utilisation de la géostatistique par ces derniers. Il s'agit du Bilan coûts/avantages, avec sécurisation des volumes à dépolluer, en plus de la réalisation d'études géostatistiques à partir de compétences internes.

Ces différents contextes demandent une importante quantité de données afin d'obtenir des études géostatistiques de qualité.

e) Recours à un géostatisticien

Il a été demandé aux participants s'ils avaient recours à un géostatisticien ou s'ils l'utilisaient par leurs propres moyens. Les résultats sont représentés dans la figure ci-dessous :

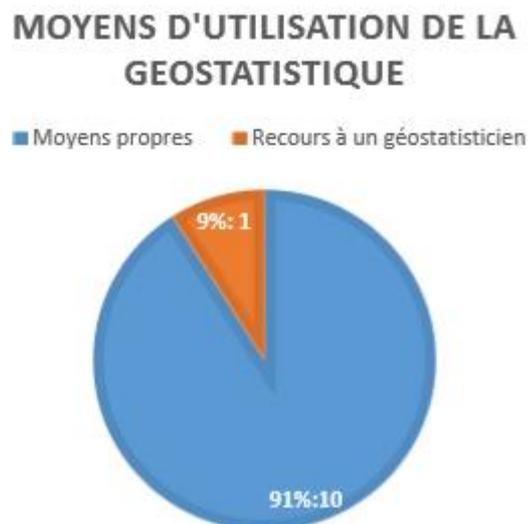


Figure 14: Graphique représentant la voie d'utilisation de la géostatistique.

91% des participants utilisant la géostatistique l'utilisent par leurs propres moyens. Il a aussi été constaté chez les participants n'utilisant pas l'outil de géostatistique que la plupart d'entre eux a recours à un géostatisticien dans les cas où leur bureau d'études a besoin d'effectuer une étude géostatistique.

f) Formation des géostatisticiens

Les acteurs utilisant la géostatistique ont répondu à la question : « Si vous l'utilisez grâce à vos propres moyens, des formations spécifiques ont-elles été effectuées pour l'utiliser ? » dont voici les résultats dans la figure ci-dessous :

SUIVI D'UNE FORMATION SPÉCIFIQUE À LA GEOSTATISTIQUE

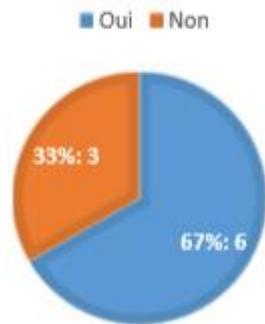


Figure 15: Pourcentage des acteurs ayant suivi une formation spécifique.

67% des acteurs utilisant la géostatistique par leurs propres moyens, ont reçu une formation spécifique à l'outil de géostatistique. 33% l'utilisent sans formations. Ce manque de formation peut-être la cause d'une moins bonne efficacité de l'outil après utilisation, et peut contribuer à des erreurs et donc incertitudes et à une non satisfaction de l'outil.

g) Interprétation des résultats reliant l'âge, l'utilisation de la géostatistique, la formation et le recours à un géostatiticien.

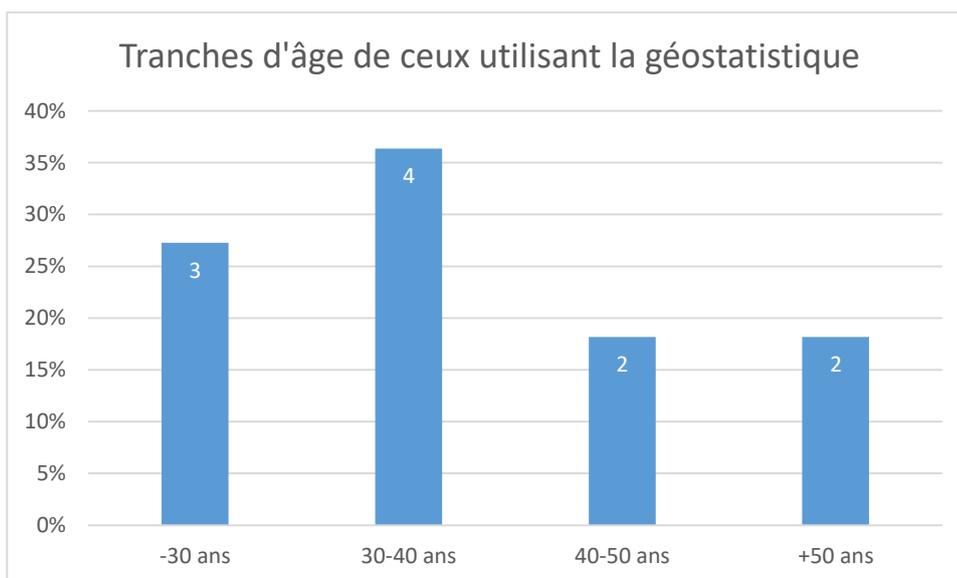


Figure 16: Tranche d'âge des acteurs utilisant la géostatistique.

D'après le graphique ci-dessus représenté en figure 13, 38,1% des répondants sont dans la tranche d'âge des 30-40 ans et sont aussi ceux qui utilisent le plus la géostatistique (36,4%), avec les moins de 30 ans (27,3%) qui représentent 28,6% des répondants. Ceux ayant été confrontés à la géostatistique parmi les 30-40 ans sont tous chargés de projets ou chefs de projets, en dehors de l'expert indépendant. La moitié d'entre eux a eu recours à un géostatisticien et un seul d'entre ceux qui utilisent l'outil géostatistique a reçu une formation à cet effet.

Parmi les moins de 30 ans, ceux confrontés à la géostatistique sont tous ingénieurs projet, un seul d'entre eux est ingénieur d'études. Ils utilisent tous l'outil géostatistique par leurs propres moyens, et ont tous été formés à l'exception d'un seul qui est ingénieur projet.

Ces premières observations peuvent permettre de constater que les utilisateurs les plus fréquents de l'outil géostatistique sont les ingénieurs et chefs de projet en majorité, tous ayant moins de 40 ans, et n'ayant pas tous recours à un géostatisticien, ni une formation spécifique pour l'utilisation de leur outil.

5. Perception de la géostatistique

Les acteurs ont été questionnés sur leur perception de la géostatistique, tout particulièrement sur la visibilité de la géostatistique, l'accessibilité ou l'existence d'informations sur cet outil, ainsi que l'efficacité de l'outil dans la réduction des incertitudes après son utilisation en diagnostic des sites et sols pollués.

a) Existence d'informations

55% des acteurs interrogés pensent qu'il n'existe pas suffisamment d'informations sur la géostatistique (voir figure 17). Ce qui signifie qu'il n'y a probablement pas assez de communication ou de formation sur la géostatistique et son utilisation.

EXISTE-IL SUFFISAMMENT D'INFORMATIONS SUR LA GÉOSTATISTIQUE



Figure 17: Visibilité de la géostatistique par les acteurs.

b) Retour d'expérience

Les acteurs utilisant la géostatistique ont été interrogés ensuite sur leur retour d'expérience après utilisation de cet outil.

En premier lieu, sur la présence ou non d'amélioration après utilisation de l'outil de géostatistique. Les résultats sont représentés sur le graphique ci-dessous :

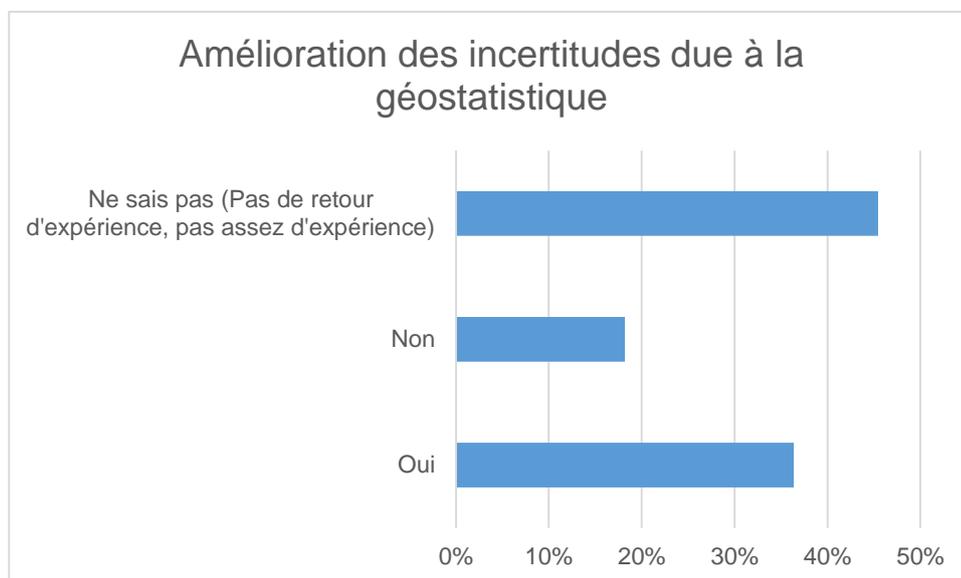


Figure 18: Graphique indiquant l'amélioration des incertitudes liée à l'utilisation de la géostatistique.

45% des 11 acteurs n'ont pas obtenu de retour après utilisation de l'outil, dont un d'entre eux estime ne pas avoir suffisamment d'expérience pour reconnaître les différentes améliorations au niveau des incertitudes. 36% des 11 acteurs observent des améliorations après utilisation de l'outil, et 18% n'en observent pas.

Les acteurs ayant observé des améliorations des incertitudes ont reçu une formation sur la géostatistique ou ont fait appel à un géostatisticien. Ce point relevé pourrait éventuellement avoir une influence sur la qualité des résultats obtenus après utilisation des méthodes de géostatistique.

Le manque de retour d'expérience peut aussi impacter la perception des acteurs de l'outil de géostatistique.

En second lieu, les acteurs ayant observé une amélioration des incertitudes ont donné une cotation de cette amélioration sur une échelle d'ordre de 1 (Très faible) à 5 (Très forte), dont les résultats suivent dans le graphique ci-après :

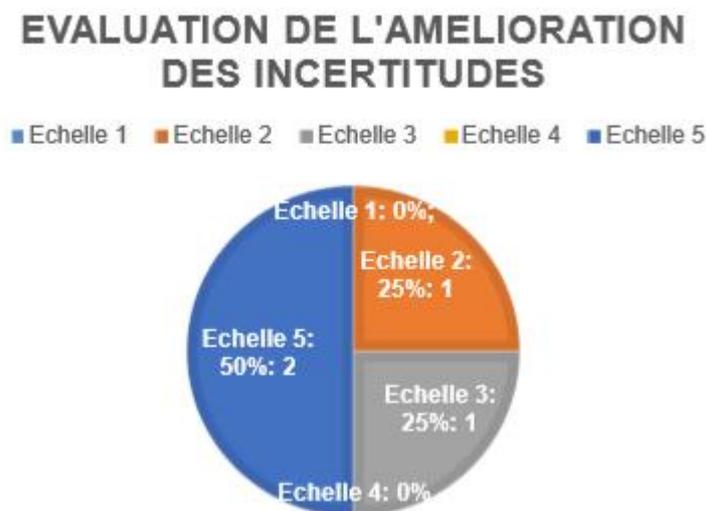


Figure 19: Graphique évaluant l'amélioration des incertitudes après utilisation de l'outil de géostatistique.

Seuls 4 acteurs ont répondu à cette question. Deux des acteurs évaluent l'amélioration des incertitudes à une échelle d'ordre 5, ce qui signifie qu'ils notent une très forte amélioration des incertitudes après utilisation de l'outil de géostatistique. Un des acteurs note une amélioration moyenne (échelle 3), et un autre, une amélioration faible (échelle 2).

Cependant, ils dénotent tous l'existence d'incertitudes résiduelles malgré l'utilisation de l'outil géostatistique et l'amélioration des incertitudes. Ces incertitudes résiduelles sont :

- le manque de données ou la maîtrise de la représentativité de la donnée ;
- la faible efficacité de la géostatistique ;
- les incertitudes spatiales ;
- la répartition hétérogène des mesures ;
- le manque d'échantillons ou la représentativité de la matrice « sols prélevés » ;
- les incertitudes analytiques ;
- la méthode de prélèvement.

Ces incertitudes résiduelles ou non négligeables ont été cotées par 5 acteurs sur une échelle allant de 1 (Très faible) à 5 (Très forte). Deux des acteurs évaluent les incertitudes résiduelles comme étant de l'ordre de 4 soit « fortes », et deux autres les déterminent comme étant de l'ordre de 3 soit « moyennes ». Seul un des acteurs pense que incertitudes résiduelles sont « très fortes », et donc que la géostatistique ne réduit que très peu ou pas les incertitudes, comme vu dans le graphique ci-dessous :

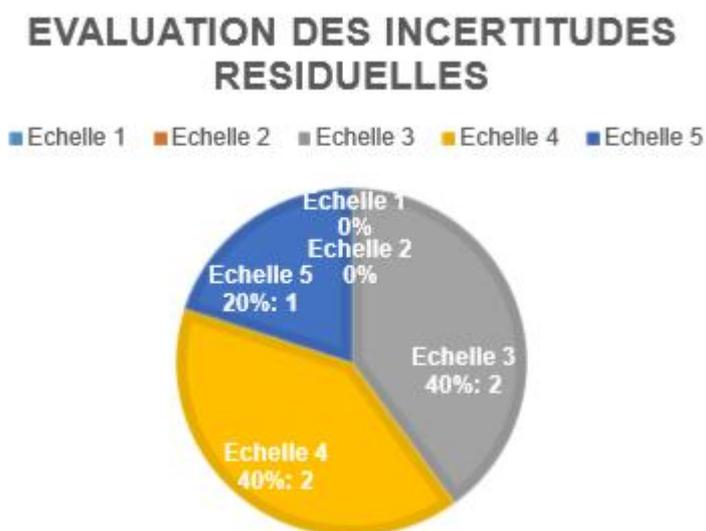


Figure 20 : Graphique évaluant les incertitudes résiduelles après utilisation de l'outil de géostatistique.

Ainsi les incertitudes même en ayant été réduites, semblent toujours importantes d'après les professionnels en sites et sols pollués. Pourtant tous les 22 professionnels interrogés à l'exception d'un seul s'accordent à dire qu'ils recommanderaient l'utilisation de la géostatistique comme les résultats du graphe suivant :

RECOMMANDATION DE LA GÉOSTATISTIQUE

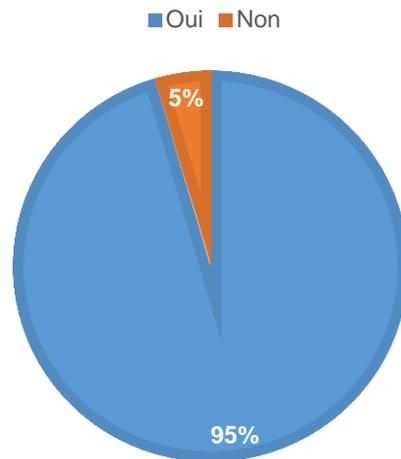


Figure 21: Pourcentage de recommandation de l'outil géostatistique par les acteurs.

L'acteur ayant répondu non a employé l'outil de géostatistique pour un bilan coûts/avantages. Cette réponse serait peut-être due à une non atteinte des objectifs fixés l'ayant poussé à ne plus utiliser la géostatistique, étant donné que son utilisation de cet outil est de « moins d'une fois par an ».

Cependant, au vu des résultats de leur perception de l'outil géostatistique, les acteurs ont été questionnés sur leur avis en ce qui concerne les possibles améliorations de l'outil géostatistique en bureau d'études.

6. Avis et Améliorations possibles de l'outil géostatistique

Certains des professionnels ont accepté de donner leur avis et des suggestions d'amélioration de l'utilisation de l'outil géostatistique en bureau d'études. Ceux-ci sont résumés ci-après :

- Un des acteurs pense qu'il faudrait « simplifier la théorie » en ce qui concerne la formation à la géostatistique, « aller à l'essentiel en rappelant le but de chaque information, paramètre ou donnée utilisée » ; et surtout « faire progresser l'envie d'utiliser la géostatistique en travaillant sur des exemples simples puis complexes » ; « le gros problème de la géostatistique est que les gens qui l'utilisent quotidiennement ne vont pas ou plus sur le terrain, et finissent par croire "dur comme fer" que seuls les mathématiques et "quelques données" sont nécessaires

- pour "faire" de la géostatistique» ; ne pas oublier qu'il faut d'abord comprendre le terrain, et que la géostatistique n'est qu'un outil « d'aide à la décision » (pour du screening ou pour comprendre un phénomène ou une répartition spatiale de paramètres ou de données de pollution ou autre) et « non une fin en soi ! » ;
- Un autre parle plutôt du « manque de confrontation de l'outil géostatistique aux outils traditionnels utilisés en phase chantier donc post études » ; « un benchmarking d'autres disciplines plus avancées en géostatistiques comme les milieux miniers ou pétroliers peut aider à l'amélioration de l'outil » ;
 - D'autres pensent que « le problème n'est pas l'outil mais sa bonne utilisation », ce qui occasionne des erreurs de calcul et d'interprétation ;
 - L'un d'entre eux pense que « le bilan coût/avantage est peu en faveur de la démarche géostatistique en SSP au regard des incertitudes » ;
 - Un des professionnels conseille « de vulgariser et sensibiliser sur la dangerosité d'une étude géostatistique » lorsqu'elle est mal faite ;
 - Enfin un autre propose de « mieux renseigner sur l'utilisation de l'outil géostatistique si peu utilisé en bureau d'études ».

B. Synthèse

Ce questionnaire donne une idée de la perception et l'utilisation actuelle de la géostatistique par les professionnels spécialisés en sites et sols pollués.

En effet, il a permis de mettre en évidence le fait que les utilisateurs les plus fréquents de la géostatistique ont en moyenne moins de 40 ans et sont en général des ingénieurs ou chefs de projet. Ce qui signifie qu'il faut une certaine expérience pour pouvoir gérer et suivre des études de géostatistique.

De plus ce questionnaire a aussi fait ressortir le fait qu'il n'existe pas suffisamment de communication et d'informations sur la géostatistique. A cela s'ajoute le fait que la géostatistique n'est pas utilisée de façon très fréquente, en moyenne une fois par an, et que les raisons de sa non -utilisation sont souvent le manque d'informations et de données, mais aussi le manque de compétences et qualification. Les professionnels qui l'utilisent font souvent appel à des géostatisticiens, et ceux qui l'utilisent n'ont parfois pas assez d'expérience pour évaluer les incertitudes, ou n'ont pas de retours d'expérience de

l'utilisation de cet outil. Ce manque de retour d'expérience peut décourager certains professionnels dans la réutilisation de l'outil de géostatistique.

Néanmoins, l'outil de géostatistique est le plus utilisé pour cartographier, dimensionner ou modéliser les sources et zones de pollution, pour l'interprétation des données, pour calculer les volumes de terres pollués et la réalisation de plans d'échantillonnage et d'échantillonnage par screening dans le cadre de plan de gestion le plus couramment et de bilans coûts/avantages. Il est aussi utilisé dans la validation de rapport dans le cadre d'études internes et l'affinement des coûts de travaux de dépollution.

Mais en dépit d'une forte et une moyenne améliorations des incertitudes constatées par les professionnels, d'importantes incertitudes résiduelles subsistent quand même après l'utilisation de l'outil géostatistique. Ces incertitudes résiduelles sont en majorité dues au manque d'informations, de données, ou d'échantillons, à des incertitudes spatiales, à des répartitions hétérogènes des mesures, etc.

Malgré cela, les professionnels recommandent tous l'utilisation de la géostatistique et proposent quelques conseils d'amélioration de l'usage de cet outil, parmi lesquels en ressortent la simplification de l'outil pour un usage rapide et efficace, une meilleure communication, et une confrontation avec des méthodes traditionnelles, ou un apport venant de secteurs où l'outil est le mieux développé comme le secteur minier ou pétrolier.

De ces suggestions découlent les différents axes développés dans la partie qui suit.

V. Axes d'amélioration et perception d'autres pays

A. Présentation des axes d'amélioration

Les axes d'amélioration suivants sont issus des résultats du questionnaire et seront comparés avec les améliorations du questionnaire venant du rapport Record de 2013 (Record, 2013) afin de dénoter les différents changements entre l'opinion des professionnels en 2013 et celle de nos jours en 2018.

1. La communication et la sensibilisation

Précédemment, le questionnaire a révélé qu'un peu plus de la moitié des professionnels interrogés pensent que la géostatistique n'est pas bien représentée en termes d'informations. Ce taux peut s'expliquer soit par un manque d'informations, soit par un souci de communication sur l'outil de géostatistique, soit un déficit des deux critères cités, auprès des professionnels du milieu des sites et sols pollués.

Pourtant cet outil est décrit dans la nouvelle version de la méthodologie sortie en 2017 (MEEM, 2017b) pour la localisation et la caractérisation des pollutions dans le chapitre des éléments préliminaires au plan de gestion. La méthode géostatistique a aussi été décrite en 2016 dans un Guide UPDS sur la caractérisation des pollutions concentrées (UPDS, 2016) ainsi que d'autres guides. Ces documents constituent des supports méthodologiques officiels sur lesquels peuvent s'appuyer les professionnels.

Mais il se trouve que les professionnels pensent qu'il vaudrait mieux sensibiliser et renseigner sur l'utilisation de la géostatistique, sur ses méthodes, ses concepts, ses avantages et surtout ses inconvénients. Ce même point avait été souligné dans le rapport Record de 2013 (Record, 2013), avec en plus la nécessité de « présenter la géostatistique dans les documents méthodologiques officiels ». Ce dernier point a été réalisé, mais ce problème de sensibilisation et de communication concernant l'utilisation de la géostatistique persiste.

Les formations permettant de comprendre l'importance de la géostatistique dans la réduction des incertitudes en diagnostics des SSP devraient être valorisées via les différentes plateformes de professionnels. Il existe différentes formations données par des structures comme Envisol, Géovariance, Brgm, Chrysae de Tesora.

Pour perpétuer la communication, et l'utilisation de la géostatistique au sein des bureaux d'études, il peut-être conseillé de former en fonction de la taille des agences, un certain nombre de personnes qui soient aptes, à l'issue de la formation, à utiliser la géostatistique de la façon la plus optimale possible pour la réduction des incertitudes, et qui soient capables par la suite d'initier ceux qui le souhaitent à la géostatistique et à l'utilisation de logiciels adaptés à la géostatistique.

Une sorte de mise à jour ou de remise à niveau des compétences et une campagne de sensibilisation pourraient-être effectuées chaque année, sur toutes les personnes susceptibles d'utiliser la géostatistique au sein des bureaux d'études. Une évaluation du niveau des compétences et connaissances en SSP se ferait par une séance de questions-réponses ou un questionnaire à remplir. La remise à niveau se ferait en donnant les réponses aux différentes questions avec une argumentation. La campagne de sensibilisation prendrait une demi-journée afin de communiquer sur les outils et méthodes de diagnostic SSP dont la géostatistique.

2. Formations

Les formations existantes sur la géostatistique, permettent soit d'initier à ses concepts et aux techniques de modélisation géostatistique des pollutions, soit d'assimiler ou comprendre le fonctionnement d'un logiciel de géostatistique.

Le problème soulevé et qui s'avère toujours être le même qu'il y a 5 ans est que ces formations peuvent très vite être décourageantes et manquer d'attraits à cause de l'aspect théorique qui peut sembler difficile à appréhender en une journée pour les concepts de base ou trop complexe.

Les acteurs semblent préférer la possibilité de d'effectuer des formations de deux jours ou de 30h pouvant simplifier l'aspect théorique par l'intermédiaire d'exemples simples et réalistes, qui rappellent l'objectif de l'utilisation des différents paramètres et qui captivent l'attention de l'apprenant tout en le faisant progresser vers des éléments plus complexes.

Proposer des séminaires d'une journée pour les individus souhaitant être sensibilisés aux avantages et inconvénients de la géostatistique. Ces séminaires présenteraient la

géostatistique en SSP, avec toutes les possibilités qu'elle ouvre dans le diagnostic SSP, ainsi que les différents logiciels qui peuvent aider à son utilisation.

3. Logiciels de géostatistique

Les guides méthodologiques décrivant les concepts et bases de la géostatistique, ou expliquant comment cartographier des pollutions par la géostatistique ne précisent pas quels logiciels peuvent être utilisés pour l'application de cet outil. Il existe plusieurs logiciels de modélisation ou de cartographie 3D dont certains d'entre eux sont spécifiques aux SSP et sont développés par des organismes ou bureaux d'études spécialisés dans la géostatistique comme Envisol ou Tesora. Ces logiciels doivent être choisis en fonction de l'expérience de l'ingénieur (un stagiaire, ou ingénieur d'études n'aurait pas assez d'expériences pour utiliser un logiciel à programmation complexe ou poussé), en fonction de la complexité de l'étude, (logiciels simples : QGis, Surfer, Excell ; logiciel complexes : ArcGis, SADA, Kartotrak, R). Les acteurs doivent être conseillés par des spécialistes sur le choix des logiciels mais aussi être accompagnés dans la mise à jour et l'utilisation des nouvelles fonctionnalités de ces logiciels.

4. Une meilleure utilisation de l'outil de géostatistique

Plusieurs acteurs ont mentionné les erreurs commises par les ingénieurs dues à une mauvaise utilisation de la géostatistique, pouvant causer des déceptions et réticences à la réutilisation de celle-ci.

Ces erreurs de mesures, de calculs ou d'interprétation sont souvent issues comme l'ont noté certains acteurs du fait que la plupart des géostatisticiens ou professionnels utilisant la géostatistique au quotidien ne vont pas souvent ou plus sur le terrain, et sont déconnectés de la réalité des faits. Ainsi ils n'adaptent pas les données en fonction des contraintes pouvant être rencontrées sur le terrain, ce qui emmène à des résultats erronés. Les erreurs de calculs peuvent aussi être dues à l'insuffisance de données pertinentes pour l'utilisation correcte de la géostatistique.

Pour ce faire, le géostatisticien ou l'ingénieur doit-être au contact de l'étude depuis le début des investigations, comprendre le terrain et ses contraintes afin d'éviter certaines erreurs. Il doit s'assurer que les échantillons et les données qui en découlent sont suffisants pour une étude géostatistique de qualité et vraiment représentatifs de la réalité du site étudié. Les incertitudes résiduelles de cette étude géostatistique doivent être

prises en compte et signalées comme l'indique la nouvelle méthodologie nationale de gestion des SSP (MEEM, 2017b).

Une étude géostatistique mal faite peut engendrer des coûts financiers supplémentaires et s'avérer être dangereuse, c'est pourquoi l'aspect financier doit être pris en compte.

5. Aspect financier

Il a été vu que la géostatistique est souvent utilisée dans l'établissement des bilans coûts/avantages. Cette utilisation de la géostatistique est sensée occasionner une baisse des coûts des travaux. Seulement un des acteurs s'est plaint de l'inadaptation de la géostatistique dans la démarche du bilan coûts/avantages. Un autre acteur ayant répondu après la phase d'analyse du questionnaire précise que l'utilisation de la géostatistique n'est pas appropriée et est trop coûteuse lorsqu'il s'agit d'un petit site, ou d'une simple analyse exploratoire d'une dizaine de sondages ; elle n'est rentable que pour les grands projets de réhabilitation, ou les grands sites à dépolluer.

La quantification des incertitudes est un élément de la géostatistique permettant la réduction du risque financier, en plus du risque environnemental ou sanitaire. Ce qui constitue un certain bénéfice important. Le problème financier est un point qui a aussi été évoqué il y a 5 ans par les acteurs du domaine SSP dans le rapport Record de 2013 (Record, 2013). Il est de nouveau important de préciser aux acteurs que le coût de l'étude géostatistique dépend du niveau de précision de l'étude (voir figure 16) et aussi de l'objectif attendu.

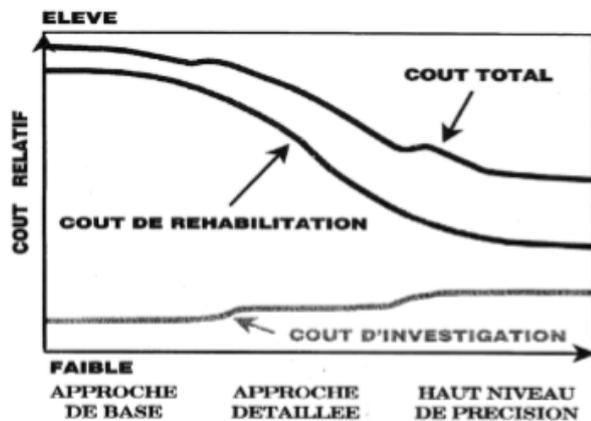


Figure 22: Lien entre niveau de détail lors des investigations (abscisse) et coûts associés (d'après (Hubé, 2008)).

6. Confrontation de la géostatistique aux outils traditionnels

Les acteurs ont évoqué la nécessité de confronter l'outil géostatistique aux outils traditionnels déjà utilisés en chantier post-études. Cette confrontation permettrait de mettre en évidence l'efficacité de la géostatistique face aux outils traditionnels. Pour ce faire, il faudrait que les formateurs, les donneurs d'ordres (DREAL, ministère, BRGM), ou associations de professionnels publient un peu plus d'études comparatives mettant en évidence le bénéfice obtenu après utilisation de la géostatistique sur un site contrairement à un site qui ne l'utiliserait pas. Cette différence pourrait se faire au niveau de l'échantillonnage des sols, qui résulterait en un dimensionnement et donc une cartographie plus précise de la pollution, amenant à une meilleure estimation du volume de terres polluées qui serait à excaver dans le cadre d'une réhabilitation par exemple.

7. Benchmarking d'autres secteurs

Il existe d'autres secteurs comme le secteur des mines, ou celui de l'exploitation du pétrole dans lequel la géostatistique est largement plus avancée. Ces secteurs ayant déjà développé des techniques plus avancées en matière de modélisation des sols pour la recherche de minerai ou de gisement de pétrole, ainsi que des guides, certains acteurs pensent qu'il serait enrichissant de s'en inspirer en matière de géostatistique des SSP.

Les associations de professionnels en collaboration avec les donneurs d'ordre pourraient élaborer des normes qui permettent de réglementer les études géostatistiques, afin qu'il

existe des standards à suivre et que les géostatisticiens ou les ingénieurs aient une base sur laquelle s'appuyer pour leurs études et s'adapter en fonction de la situation du site étudié.

Cette idée de normalisation des études géostatistiques a déjà été évoquée (Record, 2013), et devrait être remise à jour et être développée. Pour l'élaboration de ces normes, une base de données ou une plateforme mise en place par une association de professionnels des SSP comme l'UPDS ou par le ministère, contenant différentes études géostatistiques sur diverses sortes de sites pollués pourrait servir d'exemple.

8. Retour d'expérience

A l'issue de l'enquête, plusieurs acteurs ayant utilisé la géostatistique ne pouvaient évaluer l'amélioration des incertitudes, en raison d'un manque de retour d'expérience après utilisation de l'outil. Il pourrait-être instauré à l'aide des associations de professionnels et des donneurs d'ordre, une sorte de questionnaire d'évaluation, ou une grille qui permettrait d'évaluer les résultats d'une étude géostatistique une fois que celle-ci a abouti.

Les clients seraient dans l'obligation de fournir des informations nécessaires aux prestataires ayant fait l'étude, après les travaux de dépollution afin que ces derniers évaluent la réduction des incertitudes et des risques sanitaires et environnementaux apportée par leur étude. Certains de ces retours d'expérience, s'ils sont positifs, pourront servir pour l'enrichissement de la plateforme servant de base de données d'études géostatistiques évoquée précédemment au § V.A.7.

VI. Conclusion

Ce mémoire a eu pour but de connaître la perception de la géostatistique dans la réduction des incertitudes au cours du diagnostic SSP. Il a mené à la réalisation d'une enquête qui a permis de savoir de quelle façon les ingénieurs des bureaux d'études et autres professionnels en SSP perçoivent et utilisent la géostatistique en France de nos jours.

La géostatistique comme cela a été rappelé dans ce mémoire est perçue comme outil important d'aide à la décision. Elle permet de mieux comprendre la pollution d'un site, de la cartographier et d'estimer les volumes de sols contaminés. Elle aide aussi à la quantification des incertitudes associées à ces volumes et l'optimisation des stratégies d'échantillonnage.

D'après l'enquête effectuée, l'utilisation de la géostatistique nécessite une certaine expérience et des compétences spécifiques pour pouvoir gérer et suivre des études de géostatistique. De plus il est constaté qu'il n'existe pas suffisamment de communication et d'informations sur la géostatistique. Il ressort aussi de cette enquête, une utilisation peu fréquente de l'outil allant à une fois par an en moyenne. Ceci serait dû à un manque de compétences ou de qualification, et à un manque de données pour effectuer une bonne étude.

A cela s'ajoute la réticence à l'utilisation ou la réutilisation de l'outil par le manque d'expérience dans l'évaluation de ce dernier, l'absence de retour d'expérience après utilisation. Une formation adéquate des ingénieurs, une bonne sensibilisation de ceux-ci, ainsi que la mise en place d'une plateforme d'information de l'outil et un système d'évaluation des études géostatistiques faites permettraient de réduire ces incertitudes et problèmes.

Il a été noté que des incertitudes résiduelles subsistent après utilisation de la géostatistique, malgré une forte amélioration des incertitudes. Elles sont dues au manque d'informations, de données, ou d'échantillons, à des incertitudes spatiales, à des répartitions hétérogènes des mesures.

Néanmoins les professionnels suggèrent l'utilisation de la géostatistique et pensent que la simplification de l'outil pour un usage rapide et efficace, une meilleure communication, et une confrontation avec des méthodes traditionnelles, ou un apport venant d'autres secteurs (minier ou pétrolier) où l'outil est le mieux développé permettrait de l'améliorer.

La géostatistique comme tous les autres nouveaux outils proposés aux ingénieurs SSP comme aide à la décision (la géophysique, etc...) se heurterait à la réticence des ingénieurs à son utilisation, et serait parfois utilisée dans de mauvaises conditions. Comme proposition, les autorités et donneurs d'ordre peuvent réglementer, normaliser ou certifier l'utilisation de la géostatistique, afin que seuls les bureaux d'études qualifiés soient disposés à l'utiliser pour éviter toutes erreurs d'utilisation. Ainsi la bonne utilisation de la géostatistique dans les meilleures conditions possibles conduirait à une meilleure gestion des sites et sols pollués. Cet outil pourrait-il être accepté avec le temps, comme certains outils l'ont été, après acceptation du changement et une période d'adaptation ?

Bibliographie

Cao S, Lu A, Wang J, Huo L. Modeling and mapping of cadmium in soils based on qualitative and quantitative auxiliary variables in a cadmium contaminated area. *Sci Total Environ.* 2017 Feb 15;580:430-439

Finzgar N, Jez E, Volgar D, Lestan D. 2014. Spatial distribution of metal contamination before and after remediation in the Meza Valley, Slovenia. *Geoderma*, 217–218: 135–143.

Geosipol. 2005. Géostatistique appliquée aux sites et sols pollués - Manuel méthodologique et exemples d'applications. Rapport INERIS, ADEME. 139 p. http://www.geosipol.org/wpcontent/uploads/2013/02/GeoSiPol_Manuel_MethodologiqueJuin06-2-2.pdf

GeoSiPol (2012), Etudes de démonstration de l'intérêt de la géostatistique dans le domaine des sites et sols pollués. Rapport INERIS, ADEME. 169 p www.geosipol.org

Géovariances, Livre blanc. Contrôle qualité des données Pourquoi est-il indispensable dans une étude de sites et sols pollués. 9 pages. www.geovariances.com

Hayes KR. 2011. Uncertainty and uncertainty analysis methods. Issues in quantitative and qualitative risk modeling with application to import risk assessment ACERA project (0705). CSIRO. Report Number: EP102467. 136 p

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.

Guagliardi, I., et al., Assessment of lead pollution in top soils of a southern Italy area: Analysis of urban and peri-urban environment, *J. Environ. Sci.* (2015), Volume 33, Pages 179-187, ISSN 1001-0742. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jes.2014.12.025>

Jiao, W., et al., Multi-factors influencing the spatial distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils surrounding drinking water protection zone, *J. Environ. Sci.* (2013), Volume 25, Issue 8, Pages 1643-1648, ISSN 1001-0742. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(12\)60125-9](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60125-9).

Kravchenko, A.N., Robertson, G.P., 2007. Can topographical and yield data substantially improve total soil carbon mapping by regression kriging ? Agron. J. 99, 12-17.

Lion F., Colombano S., Aubert N., Boissard G. (2015) – Définir une stratégie de dépollution : approche basée sur la masse de polluant et la capacité de relargage d'une pollution. Rapport final. BRGM/RP64350-FR, 215 p., 91 fig., 13 tabl., 11 ann.

MEDD (Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable). 2007a. Diagnostic du site. Outils méthodologiques de gestion des sites pollués. 274 p

MEEM (Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer). 2017a. Introduction à la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués. 27 p

MEEM (Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer). 2017b. Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués. 128 p

Occelli. F., Systèmes d'Information Géographique et Lien Environnement – Santé SIGLES. Contribution au développement d'outils cartographiques d'aide à la décision face aux risques sanitaires liés à l'environnement. 2014. Université de Lille 2, 267 pages.

RECORD, Evaluations quantitatives des risques sanitaires de sites et sols pollués. Analyse des sources de variations et d'incertitudes dans l'estimation des expositions : Caractérisation, étude comparative et voies d'amélioration, 2014, 151 p, n°12-0675/1A

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. <http://www.recordVnet.org>

SelecDEPOL, Encapsulation sur site et élimination en centres de stockage des déchets, 2016, [En ligne]. Disponible sur internet : <http://www.selecdepol.fr/fiches-techniques/encapsulation-sur-site-et-elimination-en-centres-de-stockage-des-dechets/couts> (Consulté le 5/09/2018)

UPDS, Pollution concentrée. Définition, outils de caractérisation et intégration dans la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués, 2016, 75 pages

US-EPA. 2011. Exposure Factors Handbook : 2011 Edition. 1436 p

Table des matières

Remerciements	2
Table des figures	3
Table des tableaux	4
I. Introduction	5
I. Méthodologie de l'étude.....	7
II. Les incertitudes liées aux diagnostics des sites et sols pollués.....	10
A. Les incertitudes	10
B. Les incertitudes dans le cadre de la caractérisation des SSP.....	11
1. Les incertitudes de caractérisation des SSP.....	11
2. Les étapes de la caractérisation des SSP où sont retrouvées les incertitudes	12
C. Identification des incertitudes liées aux échantillonnages du milieu sol des sites et sols pollués	13
1. Les incertitudes en échantillonnage des sols.....	13
2. Les enjeux de ces incertitudes	14
3. Les moyens de réductions de ces incertitudes	15
III. Géostatistiques appliquées aux échantillonnages des sites et sols pollués dans la réduction des incertitudes.....	17
A. Présentation de la géostatistique et ses concepts	17
1. Définitions	17
2. Objectifs.....	17
3. Méthodes de fonctionnement de la géostatistique	18
B. Différents domaines d'applications de la géostatistique dans l'échantillonnage des sites et sols pollués	21
1. Apport de la géostatistique.....	22
2. Conditions d'Application et limites de la géostatistique	25
a) Conditions de mise en œuvre de la géostatistique appliquée à l'échantillonnage des sols	25
b) Limites de la géostatistique appliquée à l'échantillonnage des sols.....	25
C. Perception de la géostatistique ces 15 dernières années (jusqu'à 2013).	28
IV. Questionnaire et analyse de la situation actuelle	30
A. Synthèse des résultats de l'enquête.....	30
1. Typologie des réponses reçues.....	30
2. Domaine des bureaux d'études des différents acteurs.....	30
3. Tranche d'âge des participants.....	31

4.	Utilisation de l'outil de géostatistique	32
a)	Utilisation de l'outil	32
b)	Raisons de l'utilisation de l'outil géostatistique	33
c)	La fréquence d'utilisation de l'outil géostatistique.....	34
d)	Cadre d'utilisation de l'outil géostatistique	35
e)	Recours à un géostatisticien	36
f)	Formation des géostatisticiens	36
g)	Interprétation des résultats reliant l'âge, l'utilisation de la géostatistique, la formation et le recours à un géostatisticien.	37
5.	Perception de la géostatistique.....	38
a)	Existence d'informations	38
b)	Retour d'expérience	39
6.	Avis et Améliorations possibles de l'outil géostatistique.....	42
B.	Synthèse	43
V.	Axes d'amélioration et perception d'autres pays	45
A.	Présentation des axes d'amélioration.....	45
1.	La communication et la sensibilisation	45
2.	Formations	46
3.	Logiciels de géostatistique	47
4.	Une meilleure utilisation de l'outil de géostatistique.....	47
5.	Aspect financier.....	48
6.	Confrontation de la géostatistique aux outils traditionnels	49
7.	Benchmarking d'autres secteurs	49
8.	Retour d'expérience	50
VI.	Conclusion	51
	Bibliographie.....	53
	Table des matières	55
	Annexes	57
	63
	Glossaire	69
	Résumé	70

Questionnaire sur la géostatistique

Dans le cadre d'une étude universitaire (Ilis - Université de Lille) basée sur l'utilisation de l'outil de géostatistiques appliquées à l'échantillonnage en sites et sols pollués, nous vous adressons ce questionnaire afin de nous permettre de comprendre la perception et l'utilisation de cet outil dans l'amélioration des incertitudes en diagnostic des sites et sols pollués.

Nous vous remercions de prendre quelques minutes afin de répondre à ce questionnaire anonyme, qui nous permettra d'acquérir des informations nécessaires à notre étude.

Keshia Koutekissa

Etudiante en Master 2 Ingénierie de la santé: parcours "Qualité-Environnement-Santé-Toxicologie" QEST
ILIS-Université de Lille

keshia.koutekissa@etu.univ-lille2.fr

koutekissa_keshia@yahoo.fr

*Obligatoire

1.

En quoi est spécialisé votre bureau d'études en termes de sites et sols pollués ? *

Plusieurs réponses possibles.

- a. Prestation d'études, d'assistance et de contrôle
- b. Ingénierie des travaux de réhabilitation
- c. Exécution des travaux de dépollution (assainissement, réhabilitation)
- d. Recherche et/ou formation
- Autre : _____

2.

Quel est votre poste en bureau d'études?

Section 2

3. **Existe-t-il suffisamment d'informations ou de communication sur l'outil de géostatistiques appliquées au diagnostic des sites et sols pollués?**

Une seule réponse possible.

Oui

Non

4. **L'utilisez-vous?**

Une seule réponse possible.

Oui *Passez à la question 5.*

Non *Passez à la question 6.*

Section 3

5. **Si oui, pour quelles raisons l'utilisez-vous? ***

Passez à la question 7.

Section 4

6.

Si non, quelles en sont les raisons? *

Plusieurs réponses possibles.

- a. Méthode difficilement applicable ?
- b. Méthode prenant trop de temps ?
- c. Manque d'informations ?
- d. Manque de personnel ?
- e. Manque de compétence ?
- f. Méthode trop coûteuse ?
- g. Manque de matériel?
- Autre : _____

Passez à la question 16.

Section 5

7.

A quelle fréquence l'utilisez- vous dans votre bureau d'études?

Plusieurs réponses possibles.

- a. Moins d'une fois par an
- b. Une fois par an
- c. Entre 2 et 4 fois par an
- d. Une fois par mois
- e. Plus d'une fois par mois

Section 6

8.

Dans quel cadre est-il utilisé? *

Plusieurs réponses possibles.

- a. Commande d'études géostatistiques
- b. Réalisation d'études géostatistiques à l'aide de compétences internes
- c. Sous-traitance à d'autres sociétés ou consultants spécialisés dans ce domaine
- d. Plan de gestion
- e. Bilan coût/avantage
- d. Aucune utilisation ni confrontation à la géostatistique
- Autre : _____

Section 7

9.

Faites-vous appel à un géo-statisticien ou le faites-vous par vos propres moyens? ?

Une seule réponse possible.

- Recours à un géostatisticien *Passez à la question 11.*
- Par vos propres moyens *Passez à la question 10.*

Section 8

10. **Si vous l'utilisez grâce à vos propres moyens, des formations spécifiques ont-elles été effectuées pour l'utiliser ?**

Une seule réponse possible.

- Oui
 Non

Section 9

11. **En comparaison avec une méthode déterministe, constatez-vous une amélioration des incertitudes après avoir utilisé la méthode géostatistique? ***

Une seule réponse possible.

- Oui *Passez à la question 12.*
 Non *Passez à la question 13.*
 Autre : _____ *Passez à la question 16.*

Section 10

12. **Pouvez-vous évaluer cette amélioration de 1 (très faible) à 5 (très forte)**

Une seule réponse possible.

	1	2	3	4	5	
(Très faible)	<input type="radio"/>	(Très forte)				

Section 11

13.

Subsiste-il tout de même des incertitudes non négligeables après l'avoir utilisé?

Une seule réponse possible.

Oui *Passez à la question 14.*

Non *Passez à la question 16.*

Section 12

14.

Si oui, citez les plus récurrentes? *

15.

De quel ordre sont-elles sur une échelle de 1 à 5?

Une seule réponse possible.

	1	2	3	4	5	
Très faible	<input type="radio"/>	Très élevée				

Section 13

16.

Recommanderiez-vous l'outil de géostatistique à d'autres bureaux d'étude ?

Une seule réponse possible.

Oui

Non

17.

Quelles suggestions d'amélioration de l'outil géostatistique pourriez-vous donner?

Section 14

18.

A quelle tranche d'âge appartenez-vous ?

Une seule réponse possible.

-30 ans

30-40 ans

40-50 ans

+50 ans

Horodateur	En quoi est spécialisé votre bureau d'études en termes de sites et sols pollués ?	Quel est votre poste en bureau d'études?	Existe-t-il suffisamment d'informations ou de communication sur l'outil de géostatistiques appliquées au diagnostic des sites et sols pollués?
6/19/2018 12:39:23	b. Ingénierie des travaux	Chargé de projet	Oui
6/21/2018 14:51:57	a. Prestation d'études, d'a	responsable du développ	Non
6/22/2018 8:16:14	a. Prestation d'études, d'a	Chef de projets	Oui
6/22/2018 9:10:39	a. Prestation d'études, d'a	PDG	Oui
6/25/2018 12:56:11	Expertise et Tierce-expert	Expert indépendant (libér	Non
6/25/2018 13:21:26	a. Prestation d'études, d'a	gérant	Oui
6/25/2018 15:12:14	a. Prestation d'études, d'a	Dirigeant	Oui
6/25/2018 15:31:00	a. Prestation d'études, d'a	directeur	Non
6/25/2018 16:21:23	a. Prestation d'études, d'a	ingénieur études et reche	Oui
6/25/2018 20:59:24	a. Prestation d'études, d'a	responsable	Non
6/26/2018 15:52:47	a. Prestation d'études, d'a	Ingénieur études et reche	Non
6/27/2018 13:59:31	a. Prestation d'études, d'a	Ingénieur de projet	Non
7/4/2018 9:38:22	a. Prestation d'études, d'a	Ingénieur d'études	Oui
7/4/2018 10:11:51	a. Prestation d'études, d'a	Ingénieur d'études	Non
7/6/2018 9:36:46	a. Prestation d'études, d'a	Ingénieur de projet	Non
7/10/2018 14:40:19	a. Prestation d'études, d'a	Gérant d'entreprise	Non
7/17/2018 8:38:56	a. Prestation d'études, d'a	chargée d'études	Oui
7/17/2018 13:12:47	a. Prestation d'études, d'a	Stagiaire	Non
7/17/2018 14:03:54	a. Prestation d'études, d'a	assistance et de contrôle, t	Oui
7/17/2018 15:21:28	a. Prestation d'études, d'a	Ingénieur d'études	Non
7/24/2018 9:32:16	a. Prestation d'études, d'a	Ingénieur	Non
7/25/2018 14:40:38	Maitre d'ouvrage industrie	Spécialiste sites et sols p	Oui

L'utilisez-vous?	Si oui, pour quelles raisons l'utilisez-vous?	Si non, quelles en sont les raisons?	A quelle fréquence l'utilisez-vous dans votre bureau d'études?
Oui	Dimensionnement de sou	Pas assez d'échantillons	b. Une fois par an
Non		a. Méthode difficilement a	a. Moins d'une fois par an
Oui	Dimensionnement de sou	aucune	b. Une fois par an
Oui	réaliser des plans d'échar	je n'ai pas répondu NON	e. Plus d'une fois par moi
Oui	Cartographie des zones p	voir avant	a. Moins d'une fois par an
Oui	validité rapport	f. Méthode trop coûteuse	a. Moins d'une fois par an
Non		pertinent mais suppose d'	a. Moins d'une fois par an
Non		a. Méthode difficilement a	b. Une fois par an
Oui	Spécialistes du domaine	il n'y en a pas	c. Entre 2 et 4 fois par an
Non		b. Méthode prenant trop d	a. Moins d'une fois par an
Non		a. Méthode difficilement a	a. Moins d'une fois par an
Oui	Calcul de volume, représe	e. Manque de compétenc	c. Entre 2 et 4 fois par an
Oui	Représentativité et interpr	a. Méthode difficilement a	b. Une fois par an
Non		e. Manque de compétenc	b. Une fois par an
Oui	réalisation de plan de ges	a. Méthode difficilement a	b. Une fois par an
Non		c. Manque d'informations	a. Moins d'une fois par an
Non		c. Manque d'informations ?	
Non		c. Manque d'informations ?	
Non		Aucune occasion	
Non		e. Manque de compétence ?	
Oui	Statistique sur le volume de terres polluées et carte		c. Entre 2 et 4 fois par an
Oui	Il m'ai arrivé de l'utiliser pour affiner des coûts de tra		a. Moins d'une fois par an

Dans quel cadre est-il utilisé?	Faites-vous appel à un géo-statisticien ou le faites-vous par vos propres moyens? ?	Si vous l'utilisez grâce à vos propres moyens, des formations spécifiques ont-elles été effectuées pour l'utiliser ?	En comparaison avec une méthode déterministe, constatez-vous une amélioration des incertitudes après avoir utilisé la méthode géostatistique?
d. Plan de gestion, e. Bilan	Par vos propres moyens	Non	Pas de retour après utilisation
d. Aucune utilisation ni commande	Recours à un géostatisticien		Oui
d. Plan de gestion	Par vos propres moyens	Non	ne sais pas
a. Commande d'études géologiques	Par vos propres moyens	Oui	Oui
Expertise et Tierce-expert	Par vos propres moyens	Oui	cela dépend du type de données
d. Plan de gestion, e. Bilan	Par vos propres moyens	Oui	Non
d. Aucune utilisation ni commande	Recours à un géostatisticien		c'est certainement un des avantages
c. Sous-traitance à d'autres	Recours à un géostatisticien		Non
b. Réalisation d'études géologiques	Par vos propres moyens	Oui	Oui
e. Bilan coût/avantage	Par vos propres moyens	Non	bof
d. Aucune utilisation ni commande	Recours à un géostatisticien		Non
d. Plan de gestion	Par vos propres moyens	Non	je n'ai pas assez d'expérience
b. Réalisation d'études géologiques	Par vos propres moyens	Oui	Pas assez de retour d'expérience
a. Commande d'études géologiques	Par vos propres moyens	Oui	Je ne sais pas
d. Plan de gestion, e. Bilan	Par vos propres moyens	Non	Non
c. Sous-traitance à d'autres	Recours à un géostatisticien		Oui
b. Réalisation d'études géologiques	Par vos propres moyens	Oui	Oui
c. Sous-traitance à d'autres	Recours à un géostatisticien		Oui

Subsiste-il tout de même des incertitudes non négligeables après l'avoir utilisé?	Si oui, citez les plus récurrentes?	De quel ordre sont-elles sur une échelle de 1 à 5?	Recommanderiez-vous l'outil de géostatistique à d'autres bureaux d'étude ?
Non			Oui
Oui	panache	3	Oui
Oui	manque de données	3	Oui
Oui	manque de données, du contexte de l'étude, de la préparation à l'utilisation de l'outil géostatistique	3	Oui
Oui	efficacité	3	Oui
Oui	atouts de la géostatistique. Toutefois l'amélioration des incertitudes n'a de sens que si elle est liée à l'efficacité	3	Oui
Oui	/	3	Oui
Oui	C'est tout le but de la géostatistique de quantifier l'incertitude		Oui
Oui	Variabilité, incertitude liée à la variabilité	4	Non
Oui	manque de données pour répondre		Oui
Oui	manque d'expérience pour répondre		Oui
Oui	répartition hétérogène de la population	4	Oui
Oui	Non		Oui
Oui			Oui
Oui			Oui
Oui			Oui
Oui	manque d'échantillons	4	Oui
Oui	Les incertitudes résiduelles	5	Oui

Quelles suggestions d'amélioration de l'outil géostatistique pourriez-vous donner?	A quelle tranche d'âge appartenez-vous ?	
	30-40 ans	
	30-40 ans	
	30-40 ans	
il faut solliciter ENVISOL	40-50 ans	
Faire "le plus simple pos:		
Se rappeler que la géost	+50 ans	
je ne vois pas quoi répon	+50 ans	
trop vaste comme questi	40-50 ans	
	40-50 ans	
Le problème n'est généralement pas l'outil mais la bonne utilisation		
	+50 ans	
Bilan coût / avantage pei	40-50 ans	
	30-40 ans	
Aucun	-30 ans	
	30-40 ans	
vulgariser et sensibiliser	-30 ans	
	30-40 ans	
	-30 ans	
Proposer de mieux rense	-30 ans	
	-30 ans	
	30-40 ans	
	-30 ans	
Je n'ai pas assez de rect	30-40 ans	

Glossaire

ArcGis : Arc Geographic information system

BRGM : Bureau de Recherche Géologique et Minière

Cd : Cadmium

COV : Composés Organiques Volatils

CPIS : Conception de Programmes d'investigation ou de surveillance

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

ETM : Eléments Traces Métalliques

Eval : Evaluation

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

Hg : Mercure

IEM : Interprétation de l'état des milieux

INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

ISDD (Installation de Stockage de Déchets Dangereux)

ISDI (Installation de Stockage de Déchets Inertes)

ISDN (Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux)

LEVE : Levée de doute

LNE : Laboratoire Nationale de métrologie et d'Essais

OK : Ordinary krigeage

Pb : Plomb

PDG : Président directeur général

PID : Photolonization Detector

QGis : Quantum Gis (Geographic information system)

RK : Regression Kriging

RECORD : REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement

SSP : Sites et Sols pollués

TGAP : Taxe Générale sur les Activités Polluantes

UICE : Union des Consultants et Ingénieurs en Environnement

UPDS : Union des Professionnels de la Dépollution des Sites.

US-EPA : United State – Environmental Protection Agency

XRF : X-ray fluorescence spectrometry, la spectrométrie de fluorescence

Résumé

Le diagnostic des Sites et Sols Pollués (SSP) est une étape importante de la gestion des SSP permettant l'étude et la caractérisation de la pollution des SSP. Seulement, les différentes phases de ce diagnostic sont à l'origine de plusieurs incertitudes. Ces incertitudes influencent inévitablement les résultats du diagnostic empêchant la bonne estimation de la pollution des SSP. La géostatistique a été déterminée comme un excellent moyen de réduire ces incertitudes d'après le rapport Record de 2014. Le rapport Record de 2013 a montré que la géostatistique n'était pas un outil souvent utilisé par les ingénieurs et acteurs en SSP. La géostatistique ayant depuis été intégrée dans la Méthodologie Nationale de gestion des SSP révisée en 2017, ce mémoire a permis de connaître la perception et l'utilisation de cet outil par les ingénieurs de bureau d'études et acteurs en SSP de nos jours. A l'issue d'une enquête effectuée auprès de différents acteurs à travers la France, cette perception a été interprétée. Il en ressort une communication insuffisante sur la géostatistique, une réticence à utiliser l'outil en raison du manque de retour d'expérience, du manque de compétences, ainsi que de résultats décevants. Cependant la géostatistique est recommandée par les acteurs en SSP, et sa perception peut toujours être améliorée.

Mots clés : Diagnostic, SSP, incertitudes, géostatistique, perception...

The diagnosis of Polluted Sites and Soils (PSS) is an important step in the management of PSS for the study and characterization of PSS pollution. However, the different phases of this diagnosis are at the origin of several uncertainties. These uncertainties inevitably influence the results of the diagnosis preventing the proper estimation of the pollution of PSS. Geostatistics has been identified as an excellent way to reduce these uncertainties according to the Record Report of 2014. The Record Report of 2013 showed that geostatistics was not a tool often used by PSS engineers and actors. Since geostatistics has been integrated into the revised National Methodology for the Management of PSS in 2017, this dissertation made it possible to know the perception and the use of this tool by the design engineers and actors in PSS today. After a survey of different actors throughout France, this perception has been interpreted. This results in insufficient communication on geostatistics, a reluctance to use the tool due to lack of feedback, lack of skills, as well as disappointing results. However geostatistics is recommended by PSS actors, and its perception can always be improved.

Key-words: Diagnosis, SSP, uncertainties, geostatistics, perception...