



Evaluer et Réhabiliter les Sites Pollués Intérêt et Place de la Géostatistique dans la Méthodologie Nationale

L'intérêt d'une démarche géostatistique tend à être largement reconnu comme moyen de valoriser les données mesurées sur les sites pollués. Il concerne toutes les étapes de la gestion d'un site, du diagnostic préliminaire au contrôle final de pollution résiduelle après traitement, en passant par l'évaluation des risques et la dépollution. Adopter une démarche géostatistique signifie **tirer le maximum d'information des données disponibles**, pour arriver à des évaluations qui tiennent compte de la **répartition spatiale** des données et sont assorties d'une quantification de l'**incertitude**.

Toute étude géostatistique débute par une phase préliminaire dite d'**analyse statistique exploratoire des données**. Il s'agit de vérifier et évaluer les données, de définir et préparer les variables d'étude ou encore d'étudier les tendances spatiales¹ et les corrélations entre variables pour en déduire les conditions de modélisation du phénomène de pollution observé. L'analyse exploratoire de données environnementales est une prestation que FSS International propose de façon standard. Le contenu, les moyens mis en œuvre, les délais et les coûts de cette prestation sont précisés dans le document « Prestation en analyse statistique exploratoire de données environnementales ».²

Une fois établis les données et les modèles statistiques³ qui décrivent au mieux le ou les phénomènes de pollution observés sur un site, la géostatistique fournit les outils nécessaires d'estimation (par ex. krigeage) ou de simulation (par ex. génération de simulations conditionnelles) pour atteindre un certain nombre d'objectifs d'étude. Les objectifs visés peuvent être nombreux. Parmi les plus courants⁴ on peut noter :

- Cartographie de la pollution : estimation locale de teneurs en polluants et de l'incertitude.
- Délimitation et évaluation de zones à dépolluer : classification des sols par rapport à des seuils de teneur critiques, estimation de volumes de sols à dépolluer et incertitude sur ces volumes.
- Exploitation d'informations secondaires : intégration dans les modèles de données en rapport avec la pollution mais autres que des teneurs en polluant analysées en laboratoire.
- Optimisation de campagnes de reconnaissance : détermination du nombre et de la localisation des points d'échantillonnage.

D'autres thèmes peuvent également bénéficier des apports d'une approche géostatistique. Les contributions possibles de ce type d'approche à chaque étape réglementaire française de l'évaluation et la réhabilitation des sites pollués sont présentées ci-dessous.

¹ C'est-à-dire les variations de la pollution horizontalement et verticalement.

² Document établi en 2004

³ On entend par modèles statistiques des distributions (histogrammes) déduites des données, des tendances spatiales, des modèles de corrélation spatiale ou encore des relations ou corrélations entre variables.

⁴ Comme établis dans le cadre du groupe de travail **GeoSiPol**. Ces thèmes font l'objet de fiches techniques en cours d'élaboration par le groupe et dont les résumés sont téléchargeables sur le site www.geosipol.org.

1. Reconnaissances en diagnostic

Les campagnes de reconnaissance menées dans le cadre des diagnostics initiaux et approfondis peuvent bénéficier des apports de la géostatistique à plusieurs niveaux :

- **Au stade de la planification de l'échantillonnage.** Outre des recommandations générales quant aux conditions de prise d'échantillons et à l'établissement de plans d'échantillonnage, il est possible de proposer des stratégies d'échantillonnage complémentaires (nombre et localisation des points) en fonction d'objectifs imposés et de l'état de connaissance de la pollution (données disponibles, modèles géostatistiques déjà établis). Coûts, délais et précision d'estimation constituent les critères les plus fréquents d'optimisation de l'échantillonnage. Il peut s'agir par exemple de proposer un plan d'échantillonnage complémentaire qui réduise au mieux l'incertitude sur les limites ou les volumes des zones où les teneurs en un ou plusieurs polluants sont supérieures à des seuils de référence,⁵ tout en respectant une enveloppe budgétaire donnée.
- **Au stade de l'exploitation des données.** Souvent collectées à moindre frais, de nombreuses informations renseignent indirectement sur l'état de pollution d'un site sans pour autant être exploitées de manière rigoureuse pour apprécier l'ampleur de la contamination. Ces informations, dites indirectes ou secondaires, peuvent être de nature qualitative (par ex. coupes de terrains, historique du site, indices visuels de contamination), semi-quantitative (par ex. mesures rapides sur site) ou quantitative (par ex. mesures géophysiques, indices globalisants tels que l'indice HAP⁶). Les approches géostatistiques permettent d'exploiter les corrélations et tendances observées entre ces informations et les teneurs en polluant, puis de les intégrer dans les modèles pour mieux estimer les teneurs et ainsi réduire les incertitudes.
- **Au stade de la production de résultats.** Au final, la mise en œuvre d'une démarche géostatistique aboutit à une représentation 3D de la répartition spatiale de la pollution, assortie d'une estimation locale de la précision (estimation en chaque point du domaine d'étude). Cette cartographie bénéficie de la totalité des informations disponibles sur la contamination, qu'elles soient directes (teneurs) ou indirectes. Elle est fondée sur des modèles statistiques qui sont déduits des données et décrivent la répartition spatiale de la pollution. La cartographie peut être adaptée aux objectifs d'étude. Une simple carte d'estimation⁷ des teneurs en place peut parfois suffire. Plus fréquemment, des cartes de classification des sols par rapport à des seuils de teneurs critiques doivent être produites. L'obtention de ces cartes fait appel à des méthodes plus avancées d'estimation ou de simulation des teneurs.⁸ Il est parfois nécessaire de modéliser des situations relativement complexes, lorsque plusieurs polluants à seuils doivent être pris en compte avec des seuils différents selon le type de réaménagement envisagé ou la technique de dépollution à mettre en œuvre. La flexibilité des méthodes géostatistiques permet de s'adapter à chaque situation particulière.

⁵ Rappelons que dans les études de sols pollués l'objectif principal n'est pas d'estimer avec précision les teneurs, qu'elles soient faibles ou fortes, mais d'estimer si ces teneurs sont plutôt supérieures ou inférieures à des seuils de référence ou de risque sanitaire. En terme d'échantillonnage, les conséquences sont importantes.

⁶ HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

⁷ On utilise généralement comme méthode d'estimation le krigeage qui prend en compte la corrélation spatiale.

⁸ On parle de méthodes de krigeage non-linéaire (d'indicatrices, disjonctif, etc.) ou de simulations stochastiques.



2. *Évaluation Détaillée des risques (EDR)*

Certains sites nécessitent une évaluation détaillée des risques. Des modèles hydrodynamiques et de transport ainsi que des modèles de risque sanitaire⁹ sont mis en œuvre pour apprécier les risques associés à ces sites. Pour les sites nécessitant une réhabilitation, des objectifs et des stratégies de dépollution sont déduits de ces modèles. Des travaux¹⁰ ont montré qu'un des principaux inconvénients des modèles d'évaluation des risques utilisés en Europe était l'absence de quantification de l'incertitude sur le risque sanitaire final (sous forme d'IR ou d'ERI¹¹). Cette incertitude est liée non seulement aux modèles de transport et d'exposition adoptés, mais aussi aux données d'entrée spécifiques au site et aux paramètres des modèles. Nous avons identifié trois apports possibles d'une approche statistique et géostatistique à la quantification de l'incertitude dans ces modèles.

- **Évaluation du stock de polluant et répartition spatiale.** Dans tous les modèles d'écoulement et de transport, le stock de polluant doit être précisé comme donnée d'entrée. Une approche géostatistique permet de quantifier ce stock et d'estimer sa répartition spatiale. Dans les modèles d'évaluation des risques, la source de pollution est généralement caractérisée par une statistique unique calculée sur les données de teneurs en polluant : moyenne, médiane ou quantile. En réalité, pour un même stock de polluants dans les sols, le risque sanitaire ou de transport dépend de l'épaisseur de la zone contaminée, de son extension et de la variabilité des teneurs. La géostatistique fournit tous les résultats utiles à cette évaluation des risques.
- **Analyse de sensibilité des paramètres.** L'analyse de sensibilité signifie l'identification des paramètres spatiaux et non-spatiaux incertains qui sont déterminants en terme de risque sanitaire.¹² Ayant reconnu les situations dans lesquelles ces paramètres rendent (conjointement) le risque inacceptable,¹³ il s'agit de déterminer ensuite quels paramètres doivent être individuellement ou conjointement mieux renseignés et de quelle manière pour lever ou au moins pouvoir quantifier les incertitudes conséquentes sur le risque sanitaire. Ce type d'approche se veut un moyen de répondre au problème de l'insuffisance des données pour juger de l'incertitude sur la quantification des risques sanitaires.
- **Développement de modules spécifiques.** Il est possible de développer des modules probabilistes spécifiques de quantification de l'incertitude s'intégrant dans des codes d'évaluation des risques existants. FSS International a déjà mené ce type de développement pour le compte de bureaux d'étude (par ex. application XIMonteCarlo adaptée à des codes d'évaluation des risques développés sous Excel).

3. *Dépollution*

Une approche géostatistique peut être utilisée en appui à l'établissement d'un projet de dépollution. Son soutien peut intervenir à plusieurs niveaux.

- **Évaluation de scénarios de réhabilitation.** Ayant simulé par une approche géostatistique la pollution dans les sols, différents scénarios de réhabilitation peuvent être évalués et comparés, que ce soit par rapport à des objectifs de dépollution (teneurs limites ou valeurs de risques acceptables), à des mesures de dépollution (seuils d'acceptation différents selon les filières de traitement) ou à des

⁹ Plus rarement des modèles de risques écotoxicologiques.

¹⁰ Ferguson, C., Darmendrail, D., Freier, K., Jensen, B.K., Jensen, J., Kasamas, H., Urzelaï, A et Vegter, J. (editors), 1998. Risk assessment for Contaminated Sites in Europe. Volume 1, Scientific basis. LQM Press. Nottingham.

¹¹ IR : indice de risque, ERI : excès de risque individuel.

¹² Un paramètre est déterminant pour le risque sanitaire si, pour des valeurs fixées des autres paramètres, le risque peut passer d'acceptable à inacceptable en fonction de la valeur de ce paramètre.

¹³ La reconnaissance des situations critiques passe par l'établissement de plans d'échantillonnage (au sens statistique du terme) adaptés des paramètres incertains.



options de réaménagement du site (valeurs limites différentes selon l'affectation future). Pour chacun de ces scénarios, les coûts de réhabilitation peuvent être évalués et l'incertitude sur ces coûts être quantifiée. Tous ces résultats sont autant d'éléments d'aide à la décision dans le choix d'un plan de réhabilitation du site.

- **Classification des sols.** Etant donné le choix d'un scénario de réhabilitation du site avec des objectifs de dépollution, les modèles géostatistiques de répartition spatiale des polluants dans les sols sont utilisés pour établir une classification des sols comme contaminés ou sains en tenant compte de l'état de connaissance incertain sur la pollution (incertitudes locales sur les teneurs). L'approche géostatistique permet de formaliser les critères de classification en terme de minimisation d'un risque (au sens statistique du terme) qui peut être de mauvaise classification des sols,¹⁴ financier¹⁵ ou autre. La cartographie 3D des sols ainsi classifiés, selon des critères bien définis, permet de délimiter les zones à dépolluer et d'en déduire les quantités de matériaux à traiter (volumes, tonnages).
- **Aide à la prise de décisions opérationnelles.** Etant donné une classification des sols comme sains ou contaminés, avec dans ce dernier cas la distinction possible de niveaux de contamination différents, la connaissance des incertitudes locales sur les teneurs en polluants permet d'identifier les zones pour lesquelles la classification est fortement incertaine (grandes chances d'erreur), d'en calculer les volumes et de les positionner. Selon les volumes mis en jeu, la géométrie de ces zones ou encore le mode de traitement prévu, des décisions peuvent être prises en toute connaissance de cause pour limiter les conséquences néfastes de ces incertitudes : traitement systématique de ces zones incertaines, échantillonnage complémentaire, tri des matériaux en dépollution, etc.
- **Aide à la conception d'un schéma de tri des matériaux.** Les dépollutions sur site et hors site peuvent s'accompagner d'un tri des matériaux. Ce tri nécessite la définition préalable d'un plan de tri (dimensionnement d'une grille de tri, définition d'un protocole de prélèvement d'échantillons par maille, choix d'une technique d'analyse sur site ou en laboratoire), de critères de classification (appréciation du niveau de pollution des terres) et de critères de décision (orientation des matériaux vers des filières de stockage, de traitement ou de revalorisation selon leur niveau de pollution). Les outils géostatistiques permettent de proposer des schémas de tri optimisés répondant aux critères spécifiques à chaque site.

4. Après Dépollution

- **Vérification de l'état de pollution résiduelle.** L'efficacité d'un plan de réhabilitation est toujours contrôlée en fin de chantier. Connaissant la variabilité spatiale initiale (avant dépollution) des teneurs dans les sols, un plan d'échantillonnage peut être établi pour vérifier, avec un degré de confiance suffisant, soit que les sols pollués ont tous bien été identifiés et éliminés (cas d'excavation des sols pollués), soit que, si des sols contaminés continuent d'exister, ils ne constituent qu'une pollution résiduelle avec de très faibles teneurs ou quantités.
- **Aide à l'établissement d'un plan de suivi.** Avec ou sans dépollution, il arrive que les Autorités demandent un suivi de l'évolution d'une contamination. Il s'agit alors de proposer un plan de suivi où le nombre et la localisation des points d'échantillonnage, le type d'analyses et la fréquence des mesures sont précisés. Les capacités de la géostatistique à modéliser des phénomènes spatio-temporels peuvent là encore être exploitées.

¹⁴ Des sols seront localement jugés contaminés s'il y a plus de chances que la teneur en polluant soit supérieure à un seuil critique qu'inférieure à ce seuil ou encore s'il y a plus de chances de se trouver dans des conditions critiques que non-critiques de risque sanitaire (IR ou ERI, voir note de bas de page 11).

¹⁵ Minimiser le risque financier suppose de pouvoir évaluer le coût de toutes les situations possibles : traiter des sols effectivement pollués, traiter des sols sains, laisser en place des sols pollués, laisser en place des sols sains.

