

Zeitschrift: Archives des sciences et compte rendu des séances de la Société
Herausgeber: Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève
Band: 47 (1994)
Heft: 2: Archives des Sciences

Artikel: Détermination géostatistique de la distribution des métaux lourds dans un site pollué : étude de cas
Autor: Flamm, Christian / Celardin, Fredi / Maignan, Michel
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-740184>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 16.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Archs Sci. Genève	Vol. 47	Fasc. 2	pp. 207-217	Septembre 1994
-------------------	---------	---------	-------------	----------------

Communication présentée à la séance du 21 avril 1994

DÉTERMINATION GÉOSTATISTIQUE DE LA DISTRIBUTION DES MÉTAUX LOURDS DANS UN SITE POLLUÉ. ETUDE DE CAS

PAR

Christian FLAMM*, Fredi CELARDIN
Michel MAIGNAN*, Lionel CHABBEY** & Luc CHATENOUX****

ABSTRACT

Geostatistical determination of heavy metal distribution in a contaminated site. A case study. - A two stage sampling strategy is necessary in order to optimize the study of distribution of pollution in soils and groundwater. First, detailed sampling from a limited area coupled with statistical analysis of the data are used to determine the microvariability of the parameter(s). The results from this detailed analysis are then used to calculate the optimal spacing between samples for the larger scale study. This two stage sampling strategy can result in significant financial savings during subsequent soil or groundwater remediation. This combined sampling and statistical analysis approach is illustrated with an example from a heavy metal contaminated site.

INTRODUCTION

Echantillonner un site contaminé revient à extraire une image incomplète de la pollution de ce site: les mesures n'offrent qu'une information ponctuelle. Un certain nombre de mesures sont réparties sur la surface du site pour déterminer l'ampleur des pollutions, en espérant aboutir à une représentation compréhensible du problème. C'est d'après cette image que des calculs d'estimations des coûts et des volumes d'assainissement sont déterminés.

Trois inconnues doivent être déterminées avec un minimum d'échantillons: la nature et/ou l'hétérogénéité des polluants, la profondeur de contamination et, finalement, l'extension latérale des pollutions. Ces mesures doivent être dotées d'une représentativité satisfaisante du problème.

*Institut de Minéralogie Université de Lausanne CH-1015 Lausanne Email «Christian.Flamm@imp.unil.ch».

**Laboratoire Cantonal d'Agronomie, Case Postale 7, CH-1254 Jussy.
Année du centenaire (1894-1994)

Relier une mesure à une autre, par interpolation simple, implique l'acceptation implicite qu'une corrélation spatiale existe entre celles-ci. Or, ceci n'est pas forcément le cas: deux mesures spatialement indépendantes ne devraient pas être interpolées, car il s'en dégagerait une image erronée.

Un échantillonnage représentatif du problème sera conditionné non pas par un espacement des mesures préétabli, mais par la continuité spatiale du phénomène en présence, à déterminer par les méthodes géostatistiques. La connaissance de cette continuité spatiale en rapport avec la grandeur de la surface à explorer et les contraintes d'ordre économique définiront la densité de l'échantillonnage.

La géostatistique regroupe «un ensemble de méthodes déterministes et statistiques dirigés vers la compréhension et la modélisation de la variabilité spatiale» [1]. Elle considère la répartition spatiale des variables comme résultat d'une réalisation d'une fonction aléatoire de structure spatiale donnée. Deux mesures proches présenteront préférentiellement une auto-corrélation plus élevée que deux mesures éloignées.

La variographie fournit les outils pour mesurer et modéliser cette continuité spatiale. Le variogramme décrit la variance des accroissements des mesures éloignées de mêmes distances h , et s'exprime de la manière suivante:

$$\gamma(\bar{h}) = \frac{1}{2N(\bar{h})} \sum_{i=1}^{N(\bar{h})} [u(x_i) - u(x_i + \bar{h})]^2$$

où \bar{h} représente un vecteur de séparation des paires de mesures
 $N(\bar{h})$ le nombre de paires pour le vecteur de séparation \bar{h}
 $u(x_i); u(x_i + \bar{h})$ les valeurs des mesures séparées par \bar{h}

Le variogramme quantifie la zone d'influence d'une mesure. Celle-ci se définit par la stabilisation de la variance d'accroissements $\gamma(\bar{h})$ autour de la variance statistique. Deux mesures situées au-delà de cette distance d'influence ne devraient plus simplement être interpolées.

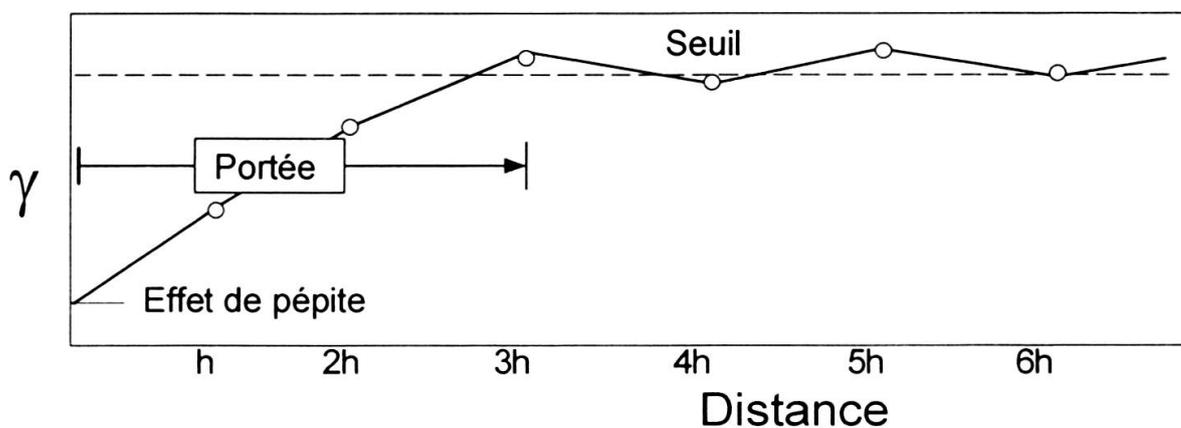


FIG. 1.

Représentation d'un (semi-)variogramme. Trois paramètres sont à déterminer pour caractériser la structure de la fonction aléatoire: l'effet de pépité, le seuil et la portée (ou zone d'influence).

Démarche géostatistique

La tactique d'investigation adoptée ici se divise en deux étapes:

1. la détermination de la continuité spatiale par une étude locale de la micro-variabilité.
2. l'échantillonnage global du site, conditionné par les résultats de la première phase.

Dans la première étape, la détermination de la continuité spatiale, au travers de la zone d'influence, peut s'effectuer à partir d'informations telles que des observations *in situ*, des mesures géophysiques ou des analyses chimiques effectuées à partir d'un échantillonnage préliminaire.

Cette étape préliminaire vise à élucider:

- l'homogénéité des pollutions autour d'un point de mesure (origine des contaminants).
- la variabilité de la profondeur de contamination autour d'un point de mesure.
- la variabilité latérale des contaminants autour d'un point de mesure.

Une des approches fréquemment utilisées consiste en la réalisation d'une croix de sondage. Cette croix est positionnée sur une surface a priori représentative des phénomènes de pollution auxquels l'historique du site et les observations sur le terrain font supposer. Elle permet d'étudier la continuité spatiale dans diverses directions tout en minimisant la prise d'échantillons pour cette première phase. La zone d'influence du variogramme définit la maille maximale d'échantillonnage.

Les résultats qui découlent de l'étude de la croix de sondage déterminent la quantité d'information nécessaire à recueillir lors de la deuxième phase d'étude pour que l'échantillonnage global soit représentatif:

- 1) le nombre d'éléments à analyser.
- 2) la profondeur d'investigation sur la parcelle.
- 3) la maille optimale d'échantillonnage.

Etude de cas:

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une remise en culture d'une parcelle désaffectée de 10'000 m² ayant servi comme site de démolition de voitures pendant une dizaine d'années. Cinq analyses avaient démontré de très forts dépassements des valeurs indicatives fédérales pour les métaux lourds. Ces observations, et la grande surface du terrain, ont exigé une étude plus précise.

1. Première phase: étude préliminaire

Deux tranchées, T1 et T2, profondes de 1 mètre et longues de 25 mètres chacune, perpendiculaires entre elles, permettent de cerner de façon précise les différents horizons du sol, et de définir la prise d'échantillons. Une troisième tranchée, T3, d'une

longueur de 5 mètres, est disposée dans la zone où une analyse et les apparences de surface montrent une très forte pollution. Cette tranchée offrira une évaluation de «pollution maximale».

ETUDE DE PROFILS TRANCHEE 1

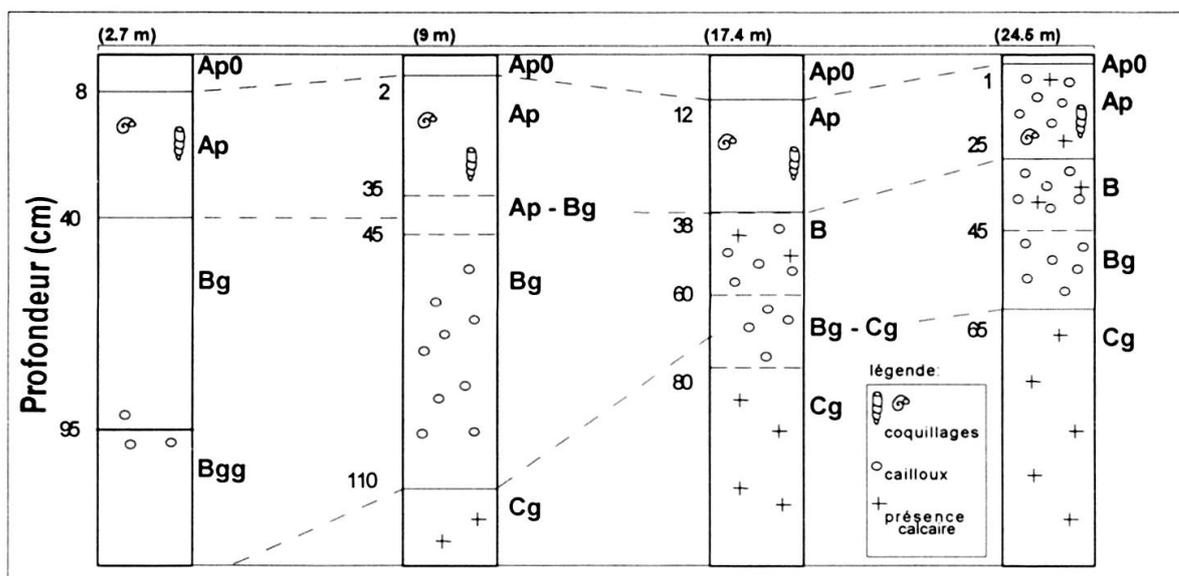


FIG. 2.

Profils pédologiques de la tranchée T1. Ap0, Apl, Bg, Bgg et Cg représentent différents horizons.

Dans le cas illustré, le terrain est composé d'un sol brun limoneux à caractère hydromorphe, sur fond calcaire. Les horizons de surface sont nettement différenciés (présence de petits coquillages) provenant vraisemblablement d'un ancien remblai pour la mise en culture. Les traces de l'activité de démolition de voitures, tels débris métalliques ou des déchets carbonisés, sont évidentes dans l'horizon superficiel.

La prise d'échantillons a eu lieu en profils verticaux, respectant les horizons, et espacés latéralement de 2 à 4 mètres. Au total, 96 échantillons ont été collectés. Leurs teneurs totales en métaux lourds (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) ont été analysés conformément à l'Ordonnance Fédérale sur les polluants des Sols (OSOL).

Méthode OSOL:

- Echantillon de terre séché et broyé à 2 mm.
- Prise 10,0 g dans 100 ml d'acide nitrique 2M.
- Extraction au bain-marie bouillant pendant 120 minutes.
- Dosage dans filtrat (S&S 602 1/2) par absorption atomique à flamme.

1.1 Homogénéité des polluants:

Les diagrammes de corrélations permettent, par l'apparition de relations entre variables, de définir des groupements d'échantillons et de variables. Des corrélations significatives entre les éléments sont indicatrices d'une communauté d'origine.

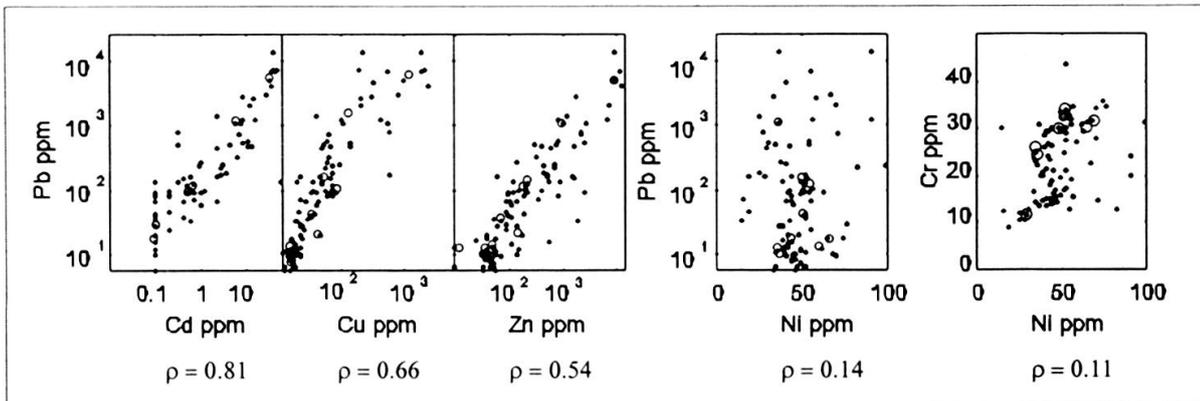


FIG. 3.

Corrélations entre métaux: (.) = teneurs dans les tranchées, (o) = teneurs dans les échantillons de contrôle sur l'ensemble de la parcelle.

Une méthode statistique robuste consiste à travailler avec les rangs des données pour supprimer les effets d'échelles ou de non linéarités qui faussent les moyennes et les coefficients de corrélation.

Les coefficients de corrélations des rangs calculés sont:

Pb-Cd: $\rho = 0.86$ Pb - Ni: $\rho = 0.28$ Ni-Cr: $\rho = 0.45$
 Pb-Cu: $\rho = 0.89$
 Pb-Zn: $\rho = 0.88$

Deux groupes de variables se détachent: d'une part le Pb, Cd, Cu et Zn, et d'autre part, le Ni et le Cr.

Ces corrélations indiquent que le type de pollution concernant Cd, Cu, Pb et Zn est homogène donc pouvant être attribuable à une même source. Pour le Ni et le Cr, il convient d'envisager au moins une autre source; la présence naturelle de ces deux éléments dans les sols genevois pourrait expliquer cette observation [3].

L'analyse factorielle des données synthétise ces constatations: sur l'analyse en composantes principales, le premier facteur regroupe les métaux de source anthropogène. Le second facteur décrit la composante géogène des mesures.

Ces corrélations stables et élevées des 4 polluants sur 60 mètres de tranchée linéaire permettent de supposer une pollution homogène. Il est alors possible d'analyser un élément représentatif de la pollution lors de l'échantillonnage final.

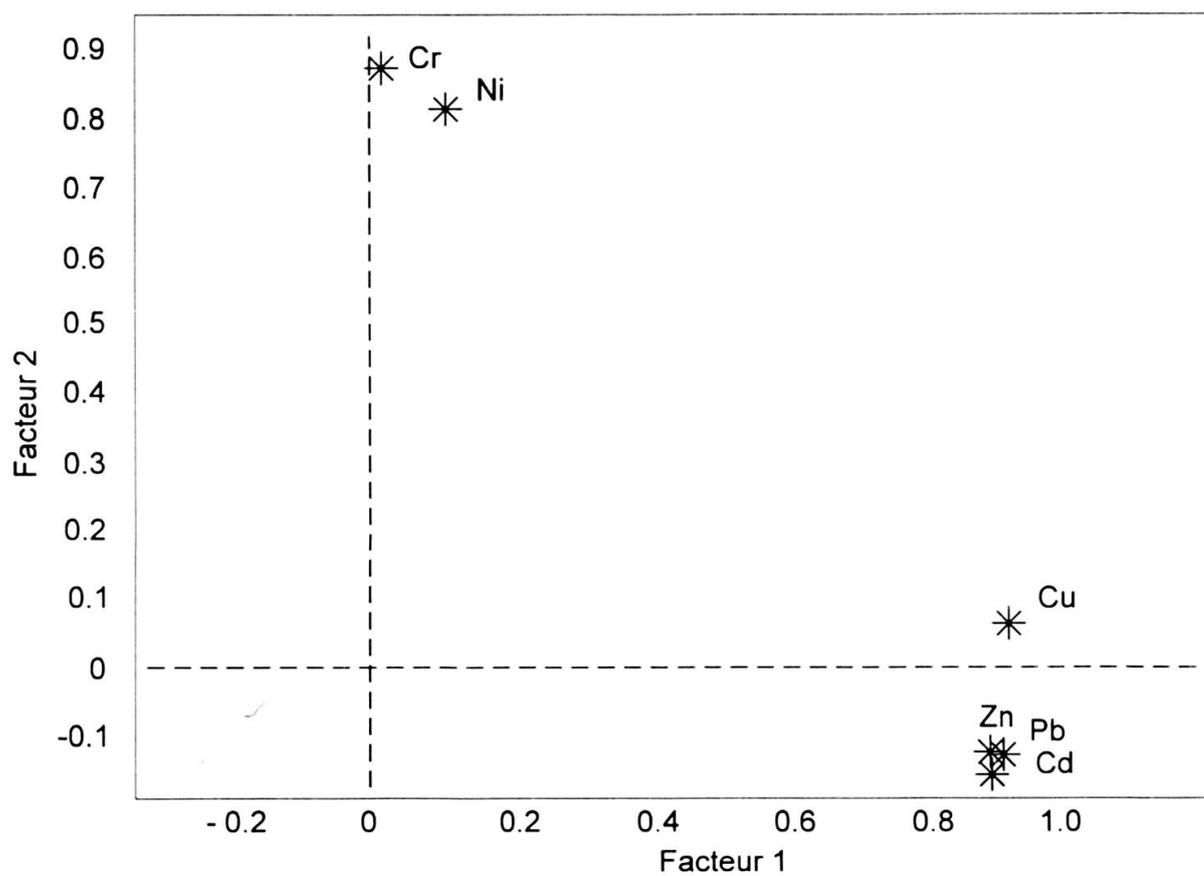


FIG. 4.

Analyse en composante principale. Le premier facteur extrait 62% de la variance totale, le second 22%.

1.2 Profondeur de contamination

Les profils verticaux montrent une décroissance des polluants avec la profondeur. Compte tenu des corrélations significatives entre Cd, Cu, Pb et Zn, le plomb, qui est l'élément dont la teneur suivant la profondeur dépasse le plus souvent les seuils officiels, servira d'indicateur de niveau de contamination pour l'ensemble de la parcelle.

La limite de contamination présente une profondeur variable pour la tranchée 1, de 20 à 60 cm. alors qu'elle se dessine de façon extrêmement régulière vers 40 cm dans la deuxième tranchée. La troisième tranchée, même très fortement polluée en surface, ne montre pas une plus grande pénétration des polluants.

Quelques considérations d'ordre économique sont indispensables pour poser les enjeux de ces calculs: pour une telle parcelle de 10'000 m², assainir une tranche de 10 centimètres d'épaisseur représente un volume de terres de 1'000 m³. A titre indicatif, si un remplacement des terres est envisagé, le prix par mètre cube actuel se situe aux alentours de 150 francs suisses. Les coûts de rémédiation varieraient, par tranche de 10

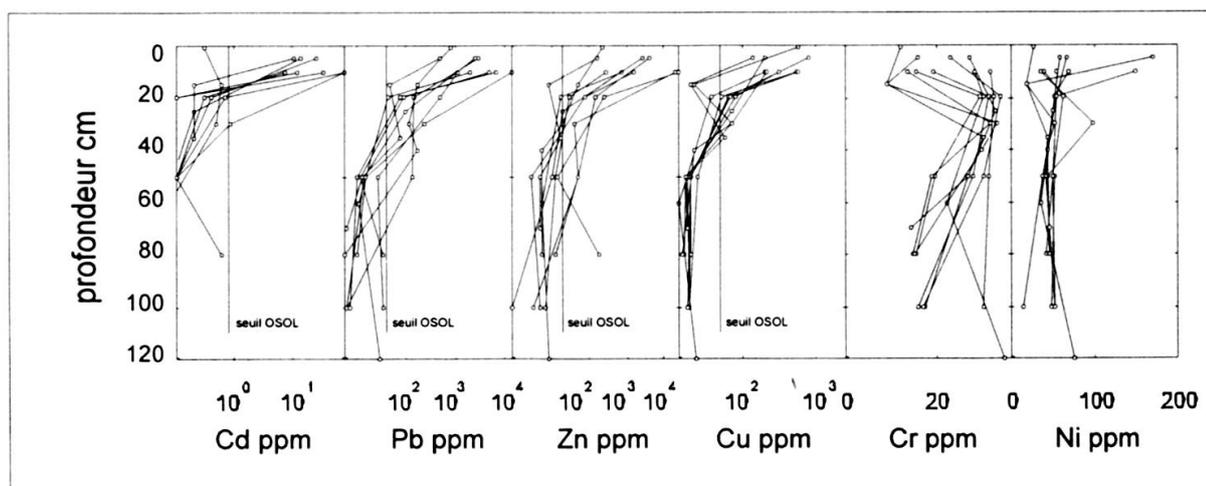


FIG. 5.

Profils verticaux des teneurs en métaux lourds dans la tranchée 1.

centimètres, entre 120'000.— et 170'000 Frs. Ces coûts peuvent, dans la cas de lavage des terres, atteindre 1000 francs par mètre cube.

Ces chiffres soulignent l'importance d'une détermination précise (parfois à 10 centimètres près) de la profondeur des terres contaminées. Assainir un grand volume de terre non contaminée peut rapidement induire de grandes dépenses inutiles.

La détermination de la profondeur d'assainissement peut s'effectuer en connaissant la probabilité de laisser du terrain contaminé en place: dans le cas présent, la majeure partie des contaminants se trouve dans les 40 premiers centimètres, avec de rares dépassements très locaux jusqu'à 60 centimètres.

1.3 Extension latérale de la pollution

Les profils latéraux des teneurs en métaux lourds le long des tranchées montrent un foyer de pollution évident dans chacune des tranchées: les teneurs en polluants croissent de façon régulière en direction de ces points. Le comportement des teneurs ne change pas selon les deux directions des tranchées.

De telles distributions latérales impliquent une non stationnarité qui se perçoit rapidement lors de la variographie sur les variables directes ou leurs dérivées logarithmiques. Dans ces cas, les variogrammes décrivent une structure en cloche. La variographie sur les rangs des données permet d'atténuer ce comportement, et l'on obtient alors une variance d'accroissement se stabilisant à partir d'une certaine distance qui décrit la zone d'influence.

La zone d'influence du plomb, tout comme celle du cadmium, se situe aux alentours de 8 mètres. La zone d'influence du nickel est de 12 mètres. Plus étendue, elle indique à nouveau le comportement différent de ce métal:

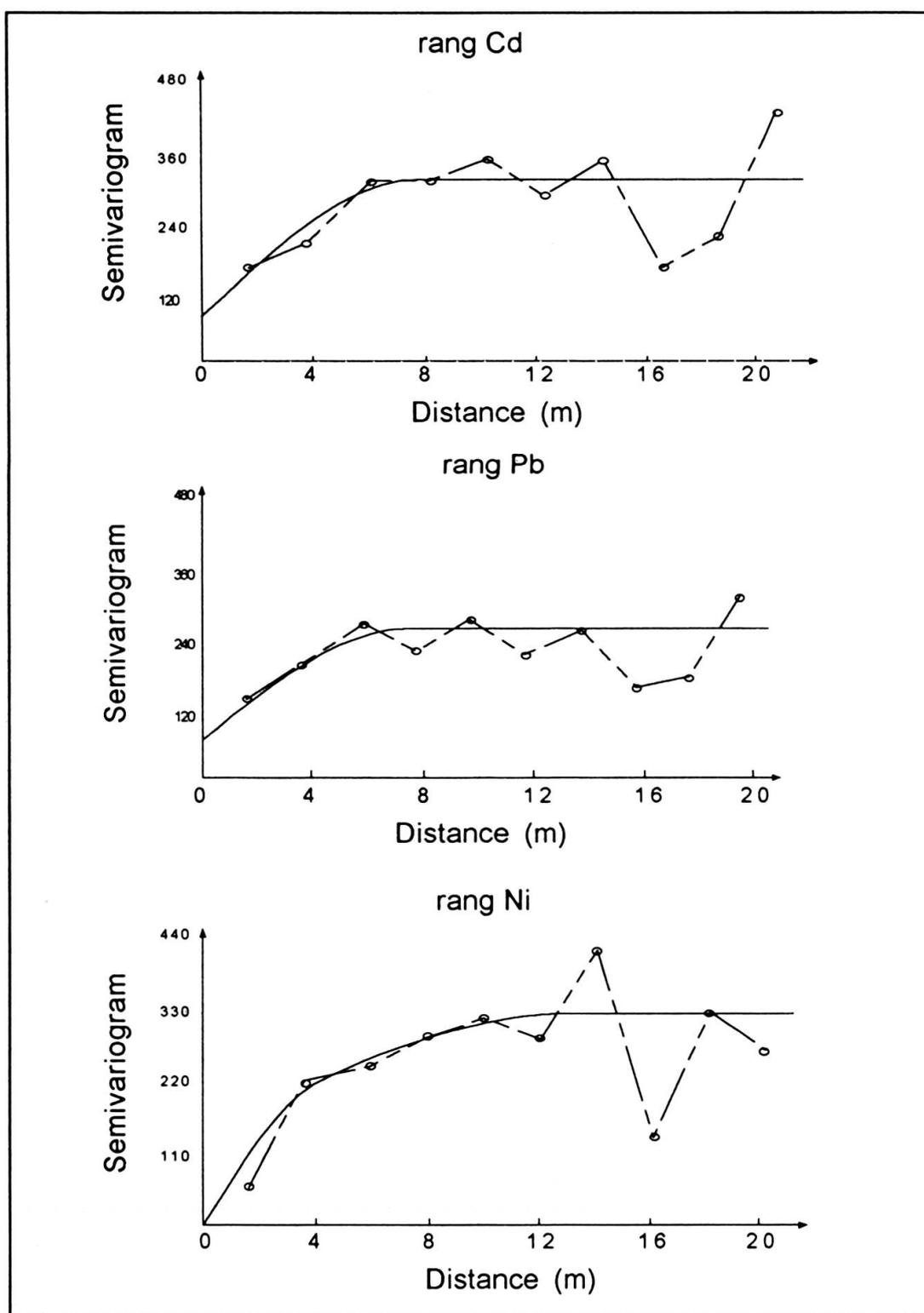


FIG. 6.

Variogrammes omnidirectionnels expérimentaux (---) et modélisés (trait continu) sur les rangs du cadmium, du plomb et du nickel.

L'obtention d'un variogramme cohérent n'est pas une garantie de la bonne description de la continuité spatiale du phénomène. Seul une concordance de structure entre différents estimateurs variographiques (corrélogramme, madogramme, ...) et l'étude des diagrammes de corrélation différée permettent de juger de la qualité de la détermination de la zone d'influence.

Dans le cas présent, tous les estimateurs indiquent une zone d'influence concordante. Une bonne description de la continuité spatiale peut donc être supposée.

Ces résultats définissent une maille maximale d'échantillonnage (8 mètres). Prélever au-delà de cette distance n'est plus représentatif du phénomène et augmente les risques de manquer un foyer de pollution lors de la cartographie finale.

La modélisation des variogrammes expérimentaux servira à l'établissement des cartes de pollution par krigeage.

2. Deuxième étape: échantillonnage global de la parcelle

A l'aide des observations précédentes, la phase d'échantillonnage principal de la parcelle illustrative a pu être optimisée pour une prise d'information minimale correcte:

- analyse de l'élément traceur (Pb), et seulement sur quelques échantillons de contrôle analyse de Cd, Cr, Cu, Ni, Zn.
- profondeur d'investigation limitée à 40 centimètres, avec contrôles aux points critiques.
- maille de prélèvement régulière maximale de 8 mètres.

Cette opération s'est déroulée en deux étapes: une première campagne de prélèvements à maille de 16 mètres, soit deux fois la zone d'influence, sur 2 profondeurs (0-20 cm et 20-40 cm).

Comme on peut le voir sur la Fig. 3, les teneurs en métaux lourds observés sur les échantillons de contrôle récoltés lors de cette étape confirment l'homogénéité des pollutions telle qu'elle se dégage des mesures effectuées dans l'étude préliminaire.

Entre 0 et 20 centimètres, les teneurs en plomb de 70 à 14'000 ppm se situent au-delà du seuil OSOL.

Entre 20 et 40 cm, les dépassements sont répartis sur une moitié du terrain seulement. Un second échantillonnage est effectué sur une maille de 8 mètres pour la partie peu contaminée, ce qui minimise le risque de manquer un éventuel dépassement. Une approche par simulations peut permettre de calculer la probabilité en chaque point d'être supérieur aux seuils officiels.

Les résultats obtenus sont interpolés par krigeage en utilisant la modélisation variographique précédente afin d'établir les cartes de pollution pour les deux profondeurs:

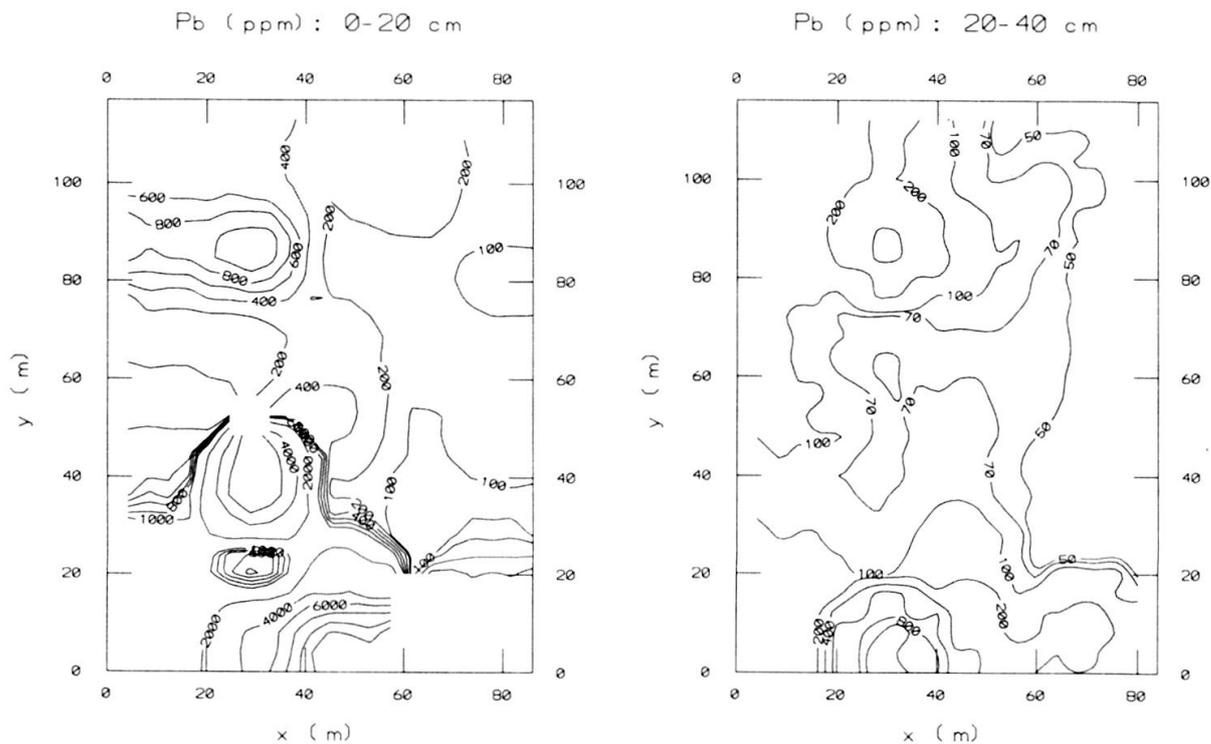


FIG. 7.

Cartes krigée du plomb (ppm) pour la profondeur 0-20 cm et 20-40 cm.

Conclusions

Une étude de site contaminé en vue de remédiation est conditionnée par des facteurs économiques qui sont les coûts d'étude et les coûts de l'assainissement.

Une étude de la microvariabilité, même en impliquant un investissement plus important au départ, augmente très clairement la compréhension et l'estimation finale du problème. La géostatistique offre un cadre méthodologique à cette démarche en optimisant l'information obtenue à partir d'un nombre minimum d'échantillons.

L'optimisation du prélèvement, la garantie de représentativité statistique et la précision des résultats peuvent rapidement, avec les tarifs actuels des analyses et des traitements de sols, engendrer des économies significatives lors des travaux d'assainissements.

REMERCIEMENTS

Cette étude a bénéficié du concours de M. Gratier, Aménagement du Territoire Canton de Vaud, pour les relevés pédologiques. Remerciements à Yvan Pannatier, UNIL.

RÉSUMÉ

La géostatistique a permis de définir une tactique d'investigation d'un site pollué. La tactique, divisée en deux phases, étudie de façon détaillée la microvariabilité des différents paramètres de mesure pour suggérer la maille maximale d'échantillonnage de la deuxième phase. La connaissance précise de la variabilité locale clarifie l'incertitude rattachée aux calculs de coûts d'assainissement. Avec les tarifs actuels des traitements, cette précision peut rapidement engendrer des économies lors des travaux de rémediation. Un site contaminé en métaux lourds, sert d'illustration à la démarche.

RÉFÉRENCES

- [1] DEUTSCH, C. V. & JOURNEL, A. G., *GSLIB-Geostatistical Software Library and User's Guide*. New York, Oxford, Oxford University Press, 1992.
- [2] ISAAKS, E. H. & SRIVASTAVA, R. M., *An introduction to applied geostatistics*. New-York, Oxford, Oxford University Press, 1989.
- [3] F. CELARDIN, L. CHATENOUX & G. MEYLAN, «Réseau Genevois d'Observation du Sol (GEOS)», *Archs Sci. Genève* 45 (2), 171-187 (1992).

Programmes PC, libre accès

- FLAMM, C., (1994) - AnaFac, programme d'analyses factorielles et des correspondances - Programmé sous Matlab PC.
- PANNATIER, Y., (1994) - *VARIOWIN: Ms-WINDOWS Programs for Exploratory Variography and Variogram Modeling in 2D*. in «Statistics of Spatial Processes: Theory and Applications. Bari, Italy sep. 27-30, 1993» Edité par Capasso V., Girone G. & Posa D. pp. 165-170.
- Geoeas - Geostatistical Environmental Assessment Software* - Computer Sciences Corporation. Public domain software.

