

Deuxièmes rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués

ADEME, Paris, 20-21 octobre 2009

Thème 1: Caractérisations et diagnostics

ETUDE EXPLORATOIRE DES TENEURS DANS LES SOLS DE FRICHES INDUSTRIELLES : RETOUR D'EXPERIENCE SUR LA REPRESENTATIVITE DES ECHANTILLONNAGES

C. de Fouquet¹ (MINES ParisTech)

Résumé

Les activités qui s'y sont succédées, ainsi que les divers remaniements - y compris lors du démantèlement des installations – ont généralement créé de fortes hétérogénéités dans les sols des anciens sites industriels. Cette variabilité spatiale a comme conséquence des incertitudes importantes sur la localisation et les teneurs des diverses substances présentes. L'extension verticale des pollutions reste souvent mal caractérisée. Or une connaissance suffisamment précise du « terme source » ainsi que des milieux affectés est indispensable pour évaluer les risques d'exposition ou pour choisir et dimensionner un traitement adapté. Mais malgré l'importance des enjeux, en particulier les surcoûts éventuels consécutifs à une dépollution inadaptée, la reconnaissance des sites pollués est souvent conduite de façon empirique.

A l'aide de quelques exemples, nous montrons comment l'analyse exploratoire des données permet une meilleure compréhension de l'organisation spatiale des teneurs, ou peut mettre en évidence les lacunes de l'échantillonnage.

L'historique de site est une information utile, mais très partielle. Une reconnaissance systématique est nécessaire pour détecter des teneurs élevées situées en profondeur ou en-dehors des zones présumées polluées, ainsi que pour cartographier les teneurs.

Quelques outils élémentaires (graphiques localisant les données avec une représentation par classes de teneurs, statistiques globales en fonction de la profondeur, histogrammes et nuages de corrélation liés), permettent notamment de détecter et de caractériser

- l'hétérogénéité des teneurs, avec par exemple une localisation préférentielle de la pollution liée au type de sol ou à l'histoire du site ;
- la variation des teneurs avec la profondeur ;
- le niveau de corrélation des teneurs des différentes substances.

Menée sur des données suffisamment nombreuses et systématiques, l'analyse variographique exploratoire permet de caractériser et de quantifier la variabilité spatiale. La structure spatiale peut parfois avoir été détruite par un remaniement complet du site, ou dans des remblais ; la représentativité d'un échantillon est alors illusoire, aucune sélectivité n'étant plus possible. Généralement, il apparaît une forte variabilité à petite distance.

En conclusion, des recommandations pour l'échantillonnage sont rappelées et argumentées, en fonction de l'étape du projet : reconnaissance initiale pour le diagnostic, conduite de la dépollution.

¹ C. de Fouquet (Ecole des Mines de Paris, 35 Rue Saint-Honoré, F-77305 Fontainebleau), +33 (1) 64 69 47 61, chantal.de_fouquet@mines-paristech.fr

Etude exploratoire des teneurs dans les sols de friches industrielles : retour d'expérience sur la représentativité des échantillonnages

Chantal de Fouquet

MINES ParisTech, Géosciences-géostatistique, 35 rue Saint-Honoré, 77305 Fontainebleau Cedex
chantal.de_fouquet@mines-paristech.fr

INTRODUCTION

Le contexte géologique et hydrogéologique, ainsi que les activités et événements qui s'y sont déroulés, font de chaque site de quelque ampleur un cas particulier. Les aménagements et les remaniements successifs des sols - y compris lors du démantèlement des installations - ont généralement créé de fortes hétérogénéités, avec comme conséquence une grande incertitude sur la localisation et les teneurs des substances présentes. Lors des phases initiales de diagnostic puis au démarrage des opérations de dépollution, l'extension verticale des pollutions reste souvent mal caractérisée. Or une connaissance suffisamment précise du « terme source » ainsi que des milieux affectés est indispensable pour évaluer les risques d'exposition ou pour concevoir un chantier de dépollution. Mais malgré les enjeux, en particulier les surcoûts éventuels résultant d'un chantier mal dimensionné, la reconnaissance des sites est encore parfois conduite de façon empirique. En particulier, les résultats des mesures pourtant onéreuses, sont rarement examinés avec attention.

Après une campagne de prélèvements, qu'apporte l'analyse exploratoire des données, avant même toute modélisation ? En quoi le coût supplémentaire et la « complication » d'une étude géostatistique se justifient-ils ?

La démarche de l'analyse exploratoire est d'abord présentée par quelques exemples, en se limitant au cas d'une seule substance. L'apport du projet LOQUAS sur plusieurs points importants est ensuite présenté : quantification de l'incertitude de mesure, caractérisation de la variabilité spatiale à petite distance.

1. L'ANALYSE EXPLORATOIRE PAR L'EXEMPLE

1.1 – L'historique de site, une information utile mais partielle

L'historique de site, avec notamment les plans successifs des anciennes installations, sont des informations utiles mais incomplètes. Ils orientent vers les substances à rechercher, indiquent des zones possibles de fortes teneurs mais n'en constituent pas un recensement exhaustif. En particulier, les déversements accidentels, les stockages provisoires ou les déplacements de la pollution lors du réaménagement du site sont souvent oubliés.

A l'issue d'une première reconnaissance, l'échantillonnage apparaît généralement resserré là où des teneurs plus fortes sont attendues ; une couverture systématique suivant un maillage large pourrait permettre, dès le début de projet, de trouver de fortes teneurs ailleurs sur le site, sans toutefois les détecter toutes. A court terme, il faut parfois chercher la pollution pour la trouver...

Calculées sur un échantillonnage préférentiel, les statistiques ne sont a priori pas extrapolables à l'ensemble du site.

La reconnaissance géophysique complète l'historique : localisation d'objets enfouis (infrastructures, fûts ...) indétectables par d'autres techniques, précisions sur la structure géologique du site, variation des « paramètres » mesurés liée au contraste des teneurs. Mais la variabilité de

ces paramètres dépendant de la profondeur et du mode d'acquisition, leur cartographie ne peut être assimilée à celle des teneurs. Comme l'historique, la géophysique oriente vers une présence possible de teneurs fortes, plus qu'elle n'en garantit l'absence.

1.2 – Les lacunes de la reconnaissance

Que peuvent « dire », ou ne pas dire, les résultats d'une reconnaissance ? Cela dépend de la façon dont l'échantillonnage a été mené, en particulier du schéma d'implantation des mesures et de la profondeur réellement investiguée. Les statistiques globales (moyenne, écart-type et coefficient de variation, égal au rapport de l'écart-type à la moyenne, quantiles) sont instructives, mais à cause de la corrélation spatiale, pour qu'elles reflètent la réalité il est préférable que les données soient régulièrement réparties sur la zone examinée. Dans le cas contraire, il convient de travailler sur des sous-ensembles des données (en extrayant un maillage régulier, par exemple), ou de les pondérer.

Souvent, seuls les tout premiers mètres sont initialement échantillonnés. Une reconnaissance restreinte aux niveaux superficiels pourrait se justifier lorsque le risque provient de ces seuls niveaux, pour les poussières par exemple. Pour l'élaboration d'un projet de dépollution, il est préférable d'investiguer assez tôt les niveaux plus profonds, ceux-ci pouvant contribuer parfois majoritairement au risque, comme pour le transfert vers la nappe. Si l'échantillonnage est arbitrairement restreint aux niveaux superficiels, la quantification de l'ensemble du « terme source », dans les remblais, les sédiments, etc. reste impossible. Pour de nombreux sites, les volumes pollués restent inconnus à l'issue du diagnostic.

La friche TV est symptomatique (figure 1). La profondeur reconnue par les « anciennes fosses » était limitée à deux mètres. La faible moyenne apparente des teneurs aux profondeurs supérieures à un mètre est une conséquence de l'effectif trop restreint : en présence d'un histogramme dissymétrique avec une forte proportion de teneurs faibles, les teneurs élevées ont une faible probabilité d'apparition dans les niveaux moins échantillonnés. Effectivement, les régressions de la teneur sur la profondeur se raccordent pour les « anciennes » et les « nouvelles fosses », plus profondes. L'absence de teneurs fortes au-delà d'un mètre sur les rares fosses plus profondes de la campagne initiale (« anciennes fosses ») était donc illusoire.

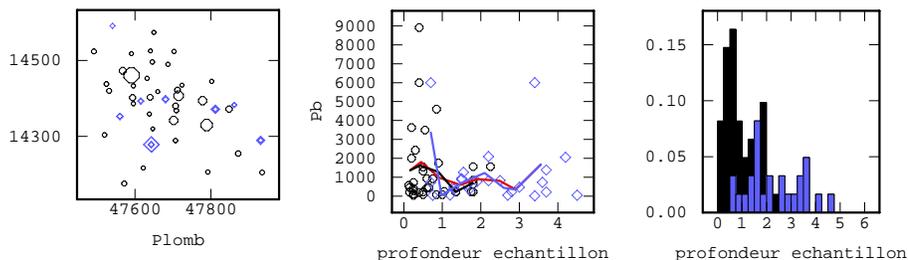


Figure 1 - Teneur en plomb, exprimée en ppm. A gauche, implantation des données (coordonnées en mètres), les symboles sont proportionnels à la teneur. Cercle noirs, les « anciennes fosses », losanges les « nouvelles ». Au milieu, nuage de corrélation entre teneur et profondeur (en mètres). Les moyennes par classe sont reportées respectivement pour les « anciennes fosses », les « nouvelles », et pour l'ensemble. A droite, histogramme des profondeurs d'échantillons, avec les « anciennes fosses » en noir et les « nouvelles » en clair.

Pour le diagnostic, la reconnaissance des niveaux plus profonds apparaît nécessaire, associée si possible à un échantillonnage systématique à maille large. Liés à la carte d'implantation, l'histogramme des profondeurs investiguées, celui des teneurs ainsi que le nuage de corrélation, complété par la régression entre teneur et profondeur, sont des outils simples et informatifs.

Lorsque différentes instances sont intervenues sur le site, l'implantation des échantillons est souvent irrégulière. Dans le plan, les zones moins reconnues n'apparaissent pas toujours de façon immédiate. Elles seront mises en évidence par la carte d'écart-type de krigeage, calculable à partir d'un ajustement approximatif du variogramme expérimental.

1.3 – Variation des teneurs avec la profondeur

Sur certains sites, les prélèvements sont effectués différemment selon la profondeur. Le support (c'est-à-dire le volume auquel la teneur se rapporte) étant variable, les teneurs des différents niveaux ne sont plus comparables sans précaution. En effet les statistiques autres que la moyenne, par exemple l'écart-type, varient avec le support ; il en est de même de l'histogramme, en particulier de la proportion des valeurs dépassant un seuil réglementaire.

Lorsque le support des mesures est fixé, la comparaison des histogrammes des teneurs aux différentes profondeurs est instructive. Sur un ancien site pétrochimique [1], le mode des fortes teneurs en surface, très atténué, ne permet de détecter qu'une partie des valeurs fortes du niveau plus profond (figure 2 ; les unités de teneur ne sont pas précisées). L'échantillonnage en surface ne permet donc pas de détecter les « taches » sous-jacentes.

Globalement sur le site, la moyenne est deux fois plus forte en profondeur, alors que localement, sur l'emprise d'anciennes unités de production, les statistiques sont analogues pour les deux niveaux, indiquant leur possible mélange. Sur cette zone, la moyenne, légèrement plus élevée que sur le reste du site, reflète comme attendu une pollution localement plus forte. Sur ce site, l'évolution de la teneur avec la profondeur varie donc suivant les endroits.

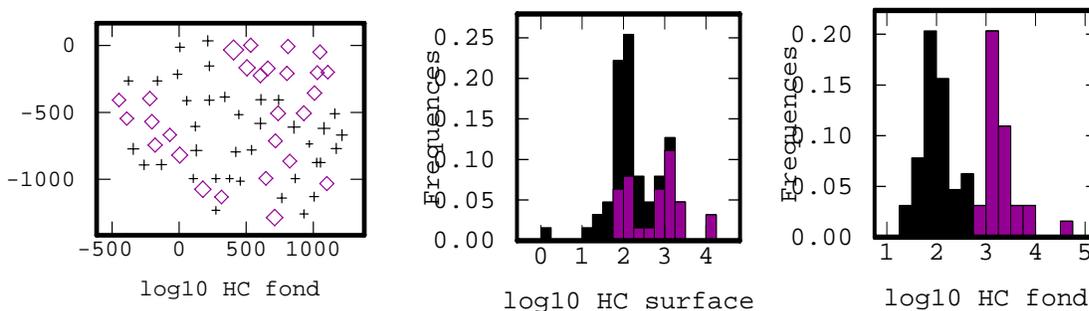


Figure 2 - Ancien site pétrochimique, échantillonnage systématique à maille large. Implantation des prélèvements (à gauche) et histogrammes du logarithme décimal des teneurs en hydrocarbures totaux, en surface (au milieu) et en profondeur (à droite). Les deux modes des teneurs en « profondeur » sont visualisés sur l'histogramme de « surface » ainsi que sur la carte d'implantation (+ pour le mode faible, ◇ pour le mode fort).

Dans un contexte industriel analogue, les friches de cokerie par exemple, l'évolution des teneurs en profondeur n'est pas systématique [2, 3]. Elle dépend aussi de la lithologie, et des transformations du site.

2. VARIABILITE SPATIALE DES TENEURS

2.1. – Rappel sur le variogramme

Le variogramme (figure 3) permet de caractériser et de quantifier la variabilité spatiale. Expérimentalement, il est calculé au facteur $\frac{1}{2}$ près comme la moyenne, par classe de distance, de

l'écart quadratique entre teneurs : $\gamma_{\text{exp}}(h) = \frac{1}{2} \frac{1}{n(h)} \sum_i (z(x_i + h) - z(x_i))^2$, x désignant un point de

l'espace, $z(x)$ la teneur en ce point, et $n(h)$ le nombre de couples de points à la distance h . La dimension du variogramme est le carré de celle de la variable z .

Lorsque les variogrammes diffèrent suivant les directions, le phénomène est anisotrope.

La portée est la distance au-delà de laquelle la corrélation spatiale s'éteint. Généralement, un phénomène combine plusieurs structures de portées différentes (ou sans portée), correspondant à différentes échelles de variabilité : décimétrique, décamétrique et hectométrique, par exemple.

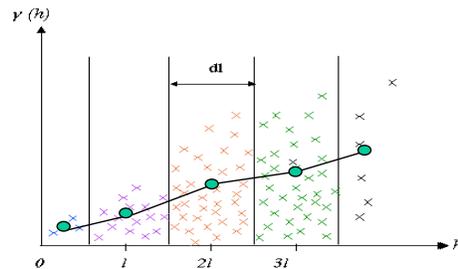


Figure 3 – Définition du variogramme

La discontinuité à l'origine (le variogramme est nul en $h=0$), appelée effet de pépite, intègre la variabilité spatiale aux échelles inférieures à l'abscisse du premier point du variogramme, ainsi que d'autres causes de variabilité comme les erreurs de mesure. Schématiquement la précision de l'estimation se dégrade avec l'amplitude croissante de cette composante. En l'absence de corrélation spatiale, le variogramme fluctue autour de la variance expérimentale : c'est l'effet de pépite pur.

2.2. – Exemple pour une pollution organique

Pour de nombreux sites, un échantillonnage suffisamment dense, révèle une corrélation spatiale, mais avec une forte variabilité à échelle métrique à décamétrique.

Pour l'ancien site pétrochimique, les données à maille d'environ 150m réparties sur tout le site présentent un variogramme croissant, avec une forte composante pépitique. Sur une partie des anciennes unités de production, le variogramme calculé au pas de 20m présente un effet de pépite relatif inférieur à 50% et une portée d'environ 100m (figure 4). L'étude variographique a également révélé une zone adjacente d'environ 300m par 150m, dans laquelle quelques teneurs pratiquement nulles alternent avec des valeurs plus fortes ; le variogramme y est pépitique. Le remblai par des matériaux propres mélangés ultérieurement à ceux du site peut expliquer cette particularité, comme cela a été effectivement confirmé.

Sur ce site contrasté, la structure spatiale varie selon la localisation et l'échelle considérées [1].

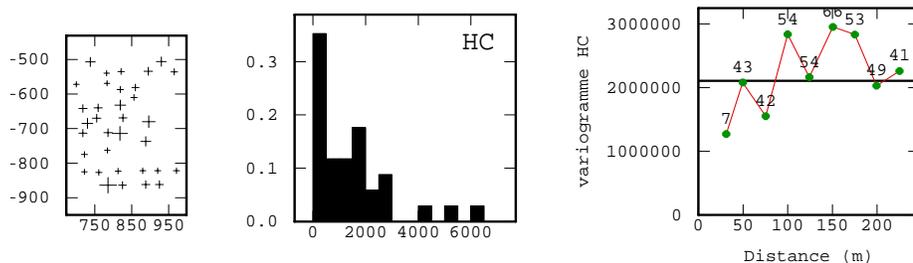


Figure 4 - Site pétrochimique, zone d'anciennes unités de production. Implantation des données (à gauche), la dimension des symboles indique la teneur. Histogramme (au milieu) et variogramme des teneurs (à droite), avec report de l'effectif par classe de distance.

Le variogramme de la figure 4 montre que la variance de la différence des teneurs entre deux points distants de 20m est d'environ $(1500 \text{ unités})^2$ et par extrapolation à l'origine, d'environ $(1200 \text{ unités})^2$ pour deux points très proches, distants par exemple d'un mètre. En pratique, ces valeurs représentent la variance de l'erreur d'estimation de la teneur en un point, par la teneur mesurée sur un échantillon prélevé respectivement à 20m ou 1 m. Considérons alors un seuil réglementaire de dépollution de 1000. Un échantillon de teneur 800 est-il localement représentatif d'une zone non

polluée (de quelle extension), et un échantillon voisin de teneur 1150 d'une zone polluée (là encore, avec quelle extension) ? Si un bloc de 3m x 3m x 0.5m est estimé par la teneur d'un échantillon composite de quatre prélèvements dans ce bloc, quelle est l'incertitude sur la teneur du bloc ? L'analyse d'un autre échantillon composite aurait-elle pu fournir un résultat très différent ?

3. LES APPORT DU PROJET LOQUAS

3.1 – Un échantillonnage exceptionnel

Dans le cadre du projet LOQUAS, une investigation multi-outils et multi-échelle a été menée sur des sites pollués par des hydrocarbures, grâce notamment à l'utilisation du Pollut-Eval®. Cet appareil analyse des échantillons d'environ 0,1g inférieurs d'environ deux ordres de grandeur à l'aliquote utilisé en Chromatographie en phase gazeuse (CPG). La question se pose donc de la représentativité des résultats, en relation avec la variabilité spatiale aux échelles inframétriques. Pour examiner cette question, un échantillonnage exceptionnel a été réalisé, par emboîtement des échelles de reconnaissance à partir d'un maillage régulier. Trois sites ont été reconnus : le site 0 et le site 1 tous deux sur l'emprise d'une ancienne usine d'essais de moteurs d'avion, et le site 2, sur l'emprise d'une ancienne station service.

L'échantillonnage du site 0, principalement bidimensionnel, est effectué à partir d'une maille de 6m, resserrée localement à 3m, 1,5m, 0,5m et 0,25m. Le « motif » comporte cinq « points Pollut-Eval® » de 8 cm de côté (figure 5), avec l'épaisseur de la tranche de sol d'environ 1,5cm. En complément, six « pavés » de 10 cm de côté sont reconnus quasi exhaustivement par 25 « points » espacés de 2cm. La matière restante, ainsi que les tranches dont sont extraits certains motifs, a été analysée par CPG, pour comparaison. La moyenne des motifs des neuf sondages de la maille à 6m est de 1295mg/kg, avec un coefficient de variation (rapport de l'écart-type à la moyenne) de 0.70.

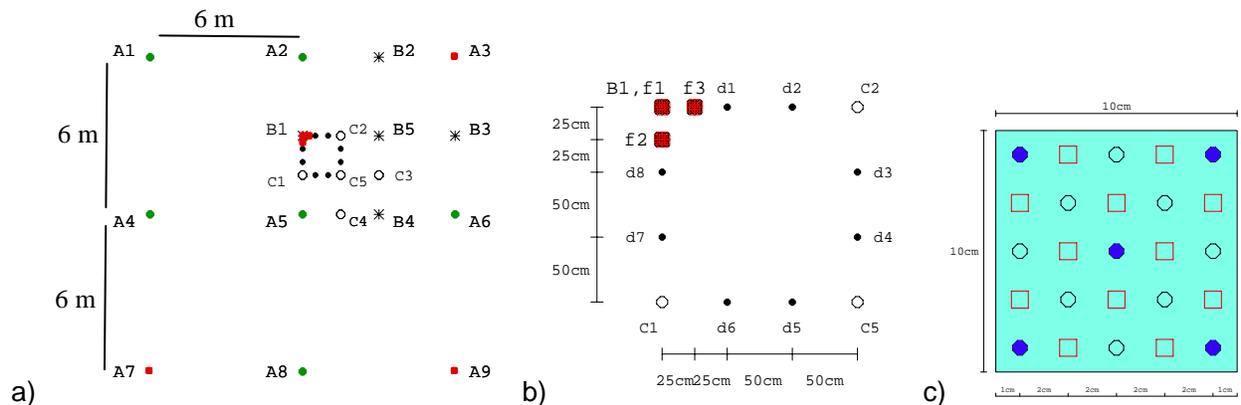


Figure 5 - Schéma d'échantillonnage du site 0. a) maillage complet ; b) agrandissement ; c) détail des pavés à 25 points et du motif à 5 « points ».

Pour le site 1, les données du diagnostic approfondi sont complétées par quelques sondages verticaux ; la « donnée » Pollut-Eval® est la moyenne de quatre mesures sur un échantillon composite conditionné en bocal.

Le site 2 est reconnu par 25 sondages à maille 5m, découpés en carottes verticales de 1m ; localement, le maillage horizontal est resserré à 1m, de façon à comparer la variabilité horizontale et verticale à même distance. La « donnée » Pollut-Eval® de référence est la moyenne pour trois prélèvements effectués directement sur la carotte homogénéisée sur le chantier. La moyenne des 96 données des sondages de la maille à 5m est de 584mg/kg, avec un coefficient de variation de 0.55. D'autres mesures systématiques ont été effectuées, avant homogénéisation.

3.2. – Répétabilité et comparaison entre mesures

3.2.1. – CPG sur carotte homogénéisée

En une dizaine de forages de la maille à 5m du site 2, et à deux profondeurs à chaque fois, deux aliquotes (arbitrairement numérotées 1 et 2) constituées directement à partir de la carotte homogénéisée sur le chantier, ont été mesurées par CPG. La différence entre les deux mesures intègre la variabilité spatiale résiduelle, l'homogénéisation effectuée sur le terrain étant nécessairement imparfaite, ainsi que toutes les « erreurs » liées à l'échantillonnage (conditionnement, préparation, etc.). Le nuage de corrélation des 18 mesures doubles (figure 6) indique une bonne concordance entre les deux résultats, à deux exceptions notables, qui détériorent le coefficient de corrélation ($r=0.6$). Des calculs élémentaires en déduisent un écart-type expérimental de mesure d'environ 110mg/kg.

La méthode de référence comporte donc une part d'incertitude. Avec une limite de 500mg/kg, ces deux échantillons seraient considérés comme légèrement pollués suivant la première paire d'analyses, mais pas suivant la seconde.

3.2.2. – Pollut-Eval® : influence de l'homogénéisation ?

Toujours pour le site 2, un calcul analogue pour 96 carottes homogénéisées, effectué pour les trois « points » Pollut-Eval® pris deux à deux, donne une faible corrélation entre mesures, autour de 0.2, avec un écart-type d'erreur d'environ 400mg/kg. Mais, ce coefficient augmente (environ 0.7) pour les prélèvements effectués dans une tranche d'environ 10cm sur la carotte non homogénéisée, avec un écart-type d'erreur de mesure voisin de 200mg/kg. Il se pourrait que le support très petit du prélèvement pour l'analyse Pollut-Eval® rende le résultat sensible, par exemple à la granulométrie du matériau désagrégé. En détruisant la structure spatiale à l'échelle centimétrique, l'homogénéisation de la carotte produirait un effet inverse à celui attendu. Cet effet n'apparaît pas pour l'analyse CPG, à cause du volume plus important des prélèvements. Il n'apparaîtrait pas non plus pour les analyses Pollut-Eval® des prélèvements non homogénéisés, du fait de la conservation de la structure spatiale à cette échelle.

La comparaison des mesures effectuées en double sur 15 points d'un « pavé » du site 0, à partir de deux prélèvements par bocal, tend à confirmer ce raisonnement. Le coefficient de corrélation élevé (0.8) correspond dans ce cas à un écart-type d'erreur de mesure d'environ 180mg/kg, valeur proche de celle obtenue pour le site 2 (sans homogénéisation), dans un contexte (et à une saison) différent.

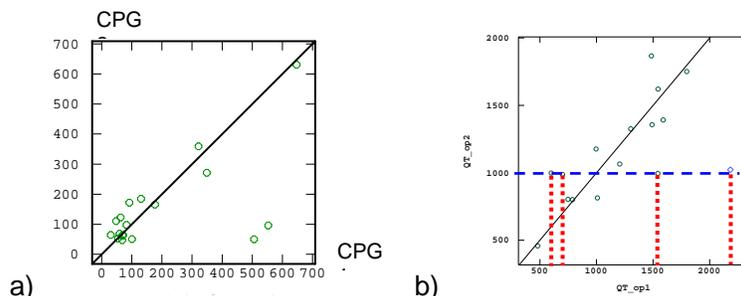


Figure 6 - Répétabilité des mesures. a) CPG, site 2 ; b) Pollut-Eval®, un « pavé » du site 0.

3.2.3. – CPG et Pollut-Eval®

La comparaison entre mesures CPG et Pollut-Eval® a été examinée avec attention. Généralement, la mesure Pollut-Eval® apparaît supérieure au résultat de la CPG, avec une corrélation parfois médiocre, alors que réduite à seulement 7 points, la reproductibilité entre deux appareils Pollut-Eval® apparaît satisfaisante. Les études se poursuivent sur les raisons de ces écarts et sur les modalités du couplage des deux méthodes de mesure.

3.3 – Variabilité spatiale

3.3.1. Variabilité spatiale comparée à la variance d'erreur de mesure

Sous des hypothèses réalistes, la différence entre le variogramme de la moyenne de deux mesures « au même point » et leur « variogramme croisé » fournit une autre évaluation de la variance d'erreur de mesure. Les résultats concordent avec ceux de l'étude de corrélation précédente. Pour le site 0 comme pour le site 2, la variance d'erreur de mesure reste faible (en l'absence d'homogénéisation), comparée à la variabilité spatiale intrinsèque de la teneur (figure 7) à l'échelle centimétrique à métrique.

Ces résultats montrent la grande utilité des mesures « redondantes ».

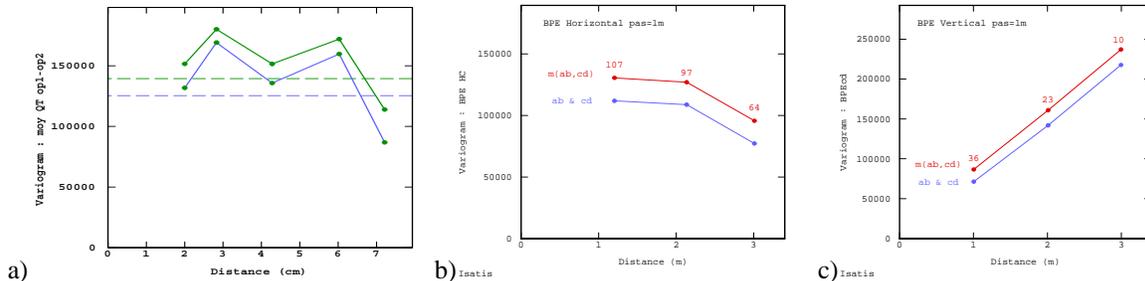


Figure 7 - Variabilité spatiale à petite distance et variance d'erreur de mesure pour le Pollut-Eval®. L'écart entre les courbes représente la variance de l'erreur de mesure, et la courbe inférieure, le variogramme de la teneur. a) site 0, variogramme horizontal à échelle centimétrique ; b) site 2, sans homogénéisation ; échelle métrique, variogramme horizontal et c) vertical.

3.3.2. – Evolution de la teneur avec la profondeur

L'échantillonnage à maille régulière du site 2 montre qu'en moyenne, la teneur commence par diminuer légèrement, puis redevient croissante et surtout plus dispersée avec la profondeur. Que se passe-t-il au-delà ? Ces résultats confirment l'utilité d'une reconnaissance en profondeur pour une évaluation correcte des volumes de terres polluées.

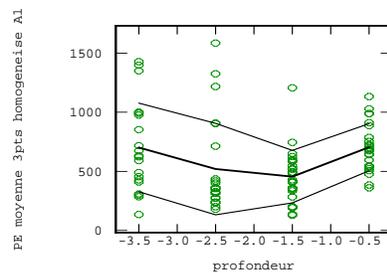


Figure 8 - Site 2. Variation de la teneur avec la profondeur (la surface est à droite). 25 sondages de la maille régulière à 5m. Moyenne de 3 « points » sur carotte homogénéisée. Moyenne par classe en gras, et intervalle à \pm un écart-type.

3.3.3. – De l'échelle centimétrique à l'échelle décamétrique

Le recalage des variogrammes aux différentes échelles est compliqué par la présence systématique d'un « effet proportionnel », c'est-à-dire l'augmentation de la variabilité avec la teneur moyenne. Le schéma d'emboîtement des échelles a permis de tirer parti des distances communes aux différentes mailles.

Pour le site 0, les variogrammes montrent la présence d'une corrélation spatiale à l'échelle décimétrique, mais avec une importante variabilité dès l'échelle centimétrique. La variabilité croît

ensuite fortement entre deux et six mètres, soit précisément les distances intervenant pour le tri des sols. La conséquence de cette importante variabilité spatiale est la médiocre précision de l'estimation. Globalement, un bloc de 15m x 15m x 1m englobant quasiment tout l'échantillonnage disponible, est estimé à 1160mg/kg, avec un écart-type d'erreur d'estimation de 220mg/kg, soit un rapport de 20%. Un intervalle conventionnel à deux écart-types (non recommandé, l'erreur n'étant pas gaussienne), représente une incertitude de $\pm 40\%$. Cette incertitude devient critique lorsque la teneur estimée se rapproche du seuil de dépollution.

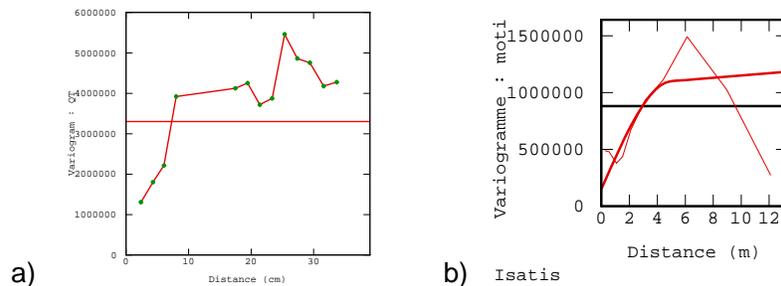


Figure 9 – Site 0, variogrammes aux différentes échelles : (a) cm à dm, (b) métrique.

Pour le site 1, le variogramme des données de la maille à 10m est pépétique. En admettant la présence d'une corrélation spatiale à échelle inframétrique, aucune « sélectivité » réaliste n'est possible. Si la teneur moyenne est voisine du seuil de dépollution, le tri nécessiterait un maillage excessivement fin.

CONCLUSION

Une fois la structure spatiale décrite grâce à l'analyse exploratoire, la modélisation commence avec la délimitation éventuelle de zones homogènes, l'ajustement d'un variogramme théorique, complété par la définition du voisinage de krigeage. Lorsqu'une structure spatiale est présente, l'estimation par krigeage permet de différencier les niveaux de concentrations, à condition de choisir la dimension des blocs en relation avec la portée et la maille de reconnaissance. Il est préférable de restreindre la cartographie des teneurs estimées aux endroits où la précision est jugée suffisante. La carte et l'histogramme de l'écart-type absolu ou relatif (rapporté à la valeur estimée) de l'erreur d'estimation par krigeage, permettent cette délimitation suivant un critère explicite.

Nous espérons avoir montré qu'en dehors de toute modélisation, l'étude exploratoire valorise les mesures en permettant une réelle compréhension de l'organisation des teneurs sur le site. Elle devrait constituer une étape (recommandée) de tout projet de dépollution.

Remerciements

Je remercie cordialement Yves Benoit (IFP), Claire Carpentier et Bruno Fricaudet (Arcadis), Claire Fauchaux et Edwige Polus-Lefèbvre (Mines ParisTech) qui ont contribué aux résultats du projet LOQUAS.

Références

- [1] de Fouquet C., Prechtel A., Setier J.-C. 2004. Estimation de la teneur en hydrocarbures totaux du sol d'un ancien site pétrochimiques : étude méthodologique. *Oil&Gas Science and Technology- Rev. IFP*, 59(3) 275-295.
- [2] Jeannée N. 2001. Caractérisation géostatistique de pollutions industrielles de sols. Cas des HAP sur d'anciens sites de cokeries. Thèse de Doctorat en Géostatistique, Ecole des Mines de Paris.
- [3] de Fouquet C. 2006. La modélisation géostatistique des milieux anthropisés. Habilitation à Diriger des Recherches. Mémoire des sciences de la Terre n° 2006-13. Académie de Paris, université Pierre-et-Marie Curie.
- [4] Fauchaux C., Lefebvre E., de Fouquet C., Benoit Y., Fricaudet B., Carpentier C., Gourry J.-C. 2008. Characterisation of a hydrocarbon polluted soil by an intensive multi-scale sampling In *Geostats 2008, proceedings of the 8th international geostatistics congress*, Santiago, Chile. Ortiz J.-M., Emery X. eds.