



LE COUPLAGE DE MESURES DE TERRAIN ET DE LA GÉOSTATISTIQUE

DES OUTILS ET MÉTHODES POUR L'OPTIMISATION D'UNE CAMPAGNE D'INVESTIGATIONS

DESCRIPTION THÉORIQUE DU PRINCIPE DE LA TECHNIQUE

Le couplage itératif de la géostatistique avec des mesures de terrain regroupe un ensemble d'outils et de méthodes mathématiques qui peut permettre, à partir des résultats de mesures de terrain, de **conduire et rationaliser une campagne d'investigations**. L'objectif est de réduire au mieux pendant la campagne de terrain l'incertitude sur la localisation de la pollution ou encore sur l'estimation d'un volume de sols pollués dont la teneur excède une valeur cible (seuil, objectif...).

Cette **démarche itérative** repose sur les étapes de collecte et d'analyse des données mesurées sur site et de traitement géostatistique qui sont à répéter à chaque phase. Le traitement géostatistique mis à jour au fur et à mesure permet d'actualiser le modèle de pollution des sols, des gaz et eaux souterraines et le modèle d'incertitudes spatiales. Grâce au modèle d'incertitudes, il est possible de proposer un nouveau plan d'investigations (sondages, piézomètres...) pour la phase suivante, dans les zones classées comme trop incertaines. L'actualisation de ce traitement géostatistique permet de décider à chaque itération de diminuer encore l'incertitude sur les estimations et donc d'améliorer considérablement l'évaluation de l'état de pollution d'un site. Ce traitement peut être réalisé en temps réel, après l'acquisition de chaque nouvelle donnée, ou à une fréquence choisie qui détermine le nombre de données à traiter et à positionner à chaque itération.

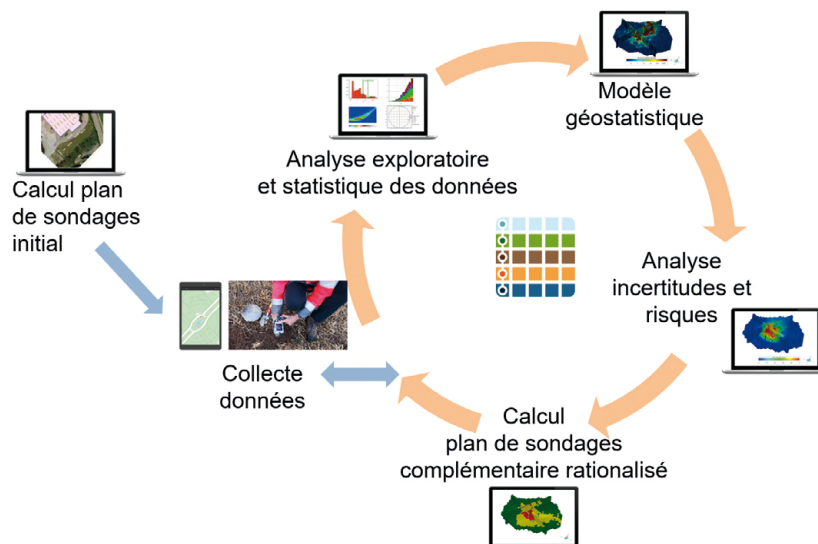
Le **couplage des outils de mesures rapides sur site avec un traitement géostatistique** permet donc une conduite de campagnes d'investigations rationalisée : à chaque itération,

le niveau de connaissance de la pollution est mis à jour pour décider de l'intérêt d'apporter de nouvelles données.

La démarche de couplage permet de répondre aux exigences suivantes :

- **Tenir compte des contraintes de coûts et de délais d'une campagne d'investigations.** Pour que les campagnes de terrain et de modélisation puissent s'enchaîner sans délai d'attente ou perte de temps pour l'opérateur de terrain ou le modélisateur, le transfert des données de terrain, le traitement géostatistique et la récupération du positionnement des prochains points de sondages (X, Y) ou d'échantillonnage (Z) doivent être convenablement synchronisés (via tablettes, GPS, connexion WIFI, drones...).
- **Être utilisable dans une grande variété de situations de pollution** (2D ou 3D, mono ou multi-polluants), **de contraintes de terrain** (inaccessibilité de certaines zones à l'échantillonnage) **et de contextes réglementaires** (valeurs seuils, valeurs cibles, taux d'abattement...). Les programmes de traitement géostatistique ont donc été conçus pour être les plus généraux possibles.

Cette démarche suppose de connaître sans délai l'état de pollution des échantillons collectés, condition que les outils de mesures sur site remplissent. Le couplage avec l'XRF portable est le plus fréquent, celui avec d'autres outils est en cours de développement (LIBS, GC MS portable, PID, hyperspectral...) à partir du moment où une interface d'échange des données est disponible pour exploiter les résultats dans le modèle géostatistique.



LE COUPLAGE DE MESURES DE TERRAIN ET DE LA GÉOSTATISTIQUE

CONTEXTE D'UTILISATION

Le couplage avec des mesures de terrain permet la conduite d'une **unique campagne d'investigations** dans des temps plus courts que ne le permettent les campagnes successives d'analyses des sols en laboratoire : il n'y a pas d'attente liée aux délais analytiques puis à l'organisation d'une nouvelle campagne de terrain.

La réussite de la démarche dépend de la qualité et de la quantité des données acquises. Les données doivent être en nombre suffisant au droit du site (un minimum de 30 valeurs est recommandé) et de qualité homogène (taille et nature des échantillons, prélèvements sur un même horizon et acquis avec la même méthodologie). Les limites de quantification dépendent du polluant et de la technique de mesure de terrain mais sont maintenant suffisamment basses pour acquérir des données de qualité, notamment pour les ETM (éléments traces métalliques).

Enfin, les experts en géostatistique et en sites et sols pollués doivent pouvoir communiquer pour bien comprendre les phénomènes modélisés. D'un point de vue pratique, la démarche suppose de comprendre et définir convenablement les incertitudes à considérer par la suite dans la démarche de gestion, de réaménagement ou de dépollution de site.

La communication vers un public non-sachant est facilitée par les cartes obtenues mais nécessite une présentation simplifiée de celle-ci.

À quelle étape ?

Le couplage de la géostatistique avec les mesures de terrain est possible à l'issue des étapes préalables de levée de doute et d'études historique, documentaire et mémorielle. Il est surtout utilisé lors de **diagnostics** pour cartographier les pollutions ou estimer des masses de polluants ou de volumes de sols pollués, tout en quantifiant les incertitudes relatives à ces estimations.

Cependant, l'obtention très rapide de cartographies ou d'estimation de quantités en fait un outil adapté :

- Au **suivi de dépollution** pour optimiser les volumes impactés à traiter,
- A la **gestion des déblais** pour l'orientation en un temps réduit des terres excavées en filières appropriées,
- A la **validation des travaux de dépollution** pour implanter les analyses de récolement des travaux et apporter un indice de fiabilité important à ces résultats. C'est un atout déterminant pour l'étude des risques résiduels.

POLLUANTS CONCERNÉS

La démarche est applicable **quel que soit le type de polluant**, dès lors qu'une **corrélation spatiale** peut être établie à partir des données d'entrée. L'analyse spatiale s'applique en particulier à des pollutions diffuses conditionnées

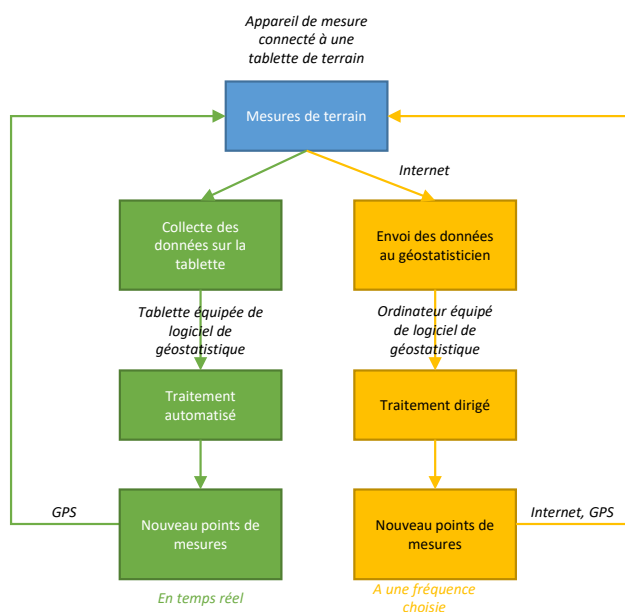
par une ou plusieurs sources de pollution et un processus de migration de la pollution. Il est également possible de prendre en compte des corrélations entre polluants et des données indirectes (PID, odeur, couleur, typologie du sol).

MATÉRIEL NÉCESSAIRE

La **technique de mesure de terrain doit être adaptée au couplage**, de manière à pouvoir déverser dans le logiciel de traitement géostatistique les données au fur et à mesure de leur acquisition.

La collecte des données peut se faire à partir de l'appareil de mesure de terrain lui-même ou d'un téléphone ou d'une tablette associée. L'opérateur de terrain doit également disposer de techniques de **positionnement géographique précis** (GPS différentiel permettant une précision de l'ordre du centimètre).

Pour le traitement géostatistique, **une tablette de terrain ou un ordinateur** équipé de programmes de traitement géostatistique adapté est nécessaire. Plusieurs logiciels sont disponibles et se différencient selon les méthodes qu'ils proposent et les facilités d'utilisation qu'ils offrent (avec ou sans traitement automatisé) pour guider l'utilisateur dans la réalisation des différentes tâches du traitement géostatistique. L'utilisation des logiciels de géostatistique nécessite néanmoins une certaine expertise y compris sur l'application aux SSP.



Deux exemples de couplage : traitement géostatistique complètement automatisé à gauche, traitement semi-automatisé ou dirigé avec intervention d'un géostatisticien à droite.



MÉTHODOLOGIE

Une **étape préalable** est nécessaire pour **valider la technique de mesure de terrain** en fonction des polluants à mesurer et de la nature des sols. Il convient aussi de vérifier le bon fonctionnement des modes et formats d'échanges de données numériques entre les différents appareils utilisés : de mesures de terrain, tablette, serveur d'échange, ordinateur...

Dans le cas de données déjà acquises sur le site, la vérification de la qualité des données d'entrée du modèle est un point primordial pour la réalisation de la modélisation. Un premier modèle géostatistique de la pollution des sols peut être créé selon l'approche recommandée par le groupe de travail GeoSiPol.

Sur le terrain, chaque étape repose sur les phases de collecte des données puis de traitement géostatistique.

Il est possible d'enregistrer en temps réel les valeurs fournies par l'appareil de terrain (indice globalisant PID en mV, teneur non corrigée en ETM fourni par le XRF...) ou bien une variable déduite des valeurs de terrain, après correction (mg/kg...). Cette deuxième possibilité nécessite une relation entre la variable et les valeurs de terrain (relation entre teneurs en COHV et mesure PID, teneur en ETM mesurée en laboratoire et teneur mesurée par le XRF de terrain...) et donc une campagne préalable sur le terrain mais permet d'appliquer des seuils (valeurs réglementaires d'acceptation en décharge, seuils de gestion de pollution...) ce qui offre davantage de possibilités en termes de résultats opérationnels.

La réalisation d'analyses complémentaires en laboratoire permet également de corrélérer les mesures de terrain aux analyses en laboratoire lorsque des résultats de mesure certifiés sont nécessaires.

Le traitement géostatistique comprend ensuite :

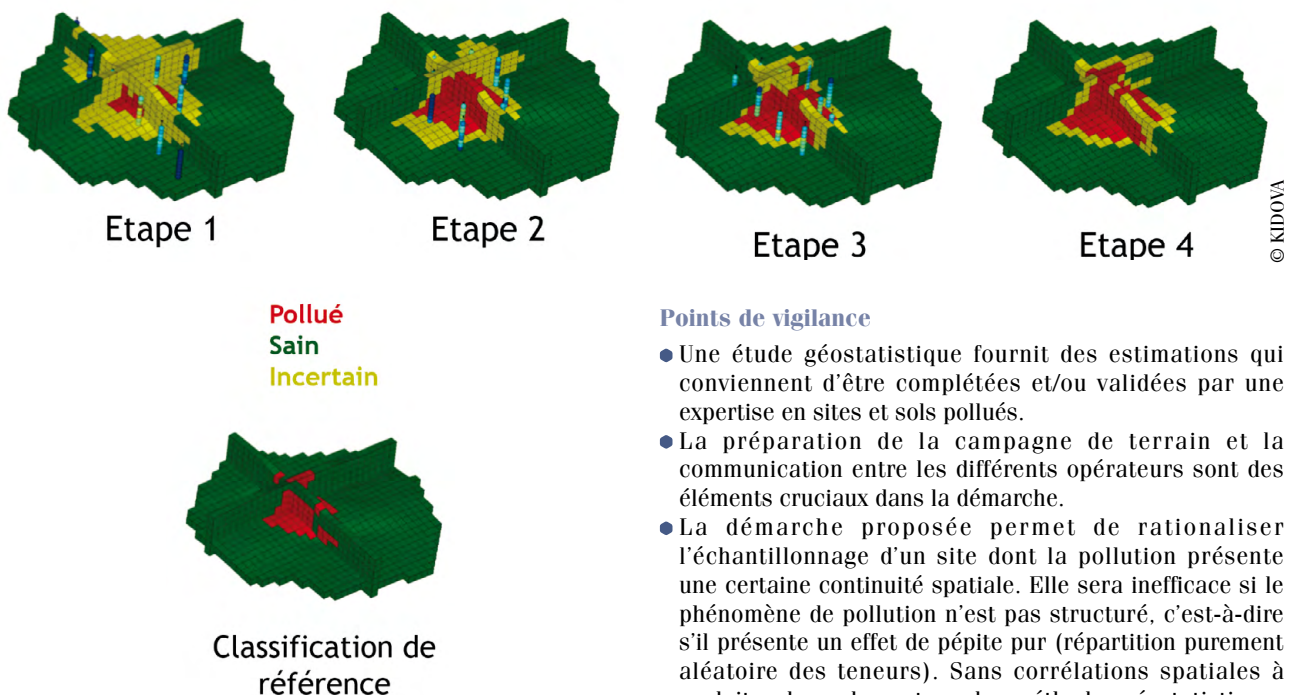
- **La mise à jour du modèle géostatistique** de pollution des sols (mise à jour possible des modèles statistiques, de

tendances spatiales, de variogrammes ou co-variogrammes, de corrélation entre polluants),

- **La mise à jour du modèle d'incertitudes spatiales** avec la quantification et la proposition d'une délimitation des volumes de sols pollués par rapport à des critères de dépassement de seuils relatifs à un scénario de gestion d'une pollution. Les seuils peuvent être des seuils de teneurs (teneurs limites en polluant au-delà desquelles les sols doivent être traités, mis en décharge ou valorisés) ou des seuils de risque (indices de risque ou excès de risque individuel au-dessus desquels les sols sont considérés comme susceptibles de nuire à l'homme et son environnement) ou un objectif de réhabilitation (dans le cas d'un abattement de masse de polluant).
- **Le calcul d'un nouveau plan d'investigations** (2D ou 3D) pour l'itération suivante qui repose sur une méthode de calcul qui détermine la stratégie d'échantillonnage : nombre de nouveaux points d'investigations à calculer (dépend du mode opératoire utilisé, en temps réel ou à une fréquence choisie) et positionnement pour lever au mieux les incertitudes à l'intérieur de la zone incertaine (une répartition de type régulière est généralement recommandée avec des adaptations possibles).

La mise à jour du traitement peut être réalisée en temps réel, après l'acquisition de chaque nouvelle donnée, ou à une fréquence choisie qui détermine le nombre de données à traiter et à positionner à chaque itération. Dans tous les cas, l'efficacité de la démarche dépend pour beaucoup de la méthode de calcul de plans d'investigations utilisée.

Les étapes de mesures sur site et de traitement géostatistique des données sont répétées jusqu'à ce que la classification des sols ait atteint un niveau de précision acceptable ou bien lorsque le coût ou la durée de reconnaissance est épuisé.



Points de vigilance

- Une étude géostatistique fournit des estimations qui conviennent d'être complétées et/ou validées par une expertise en sites et sols pollués.
- La préparation de la campagne de terrain et la communication entre les différents opérateurs sont des éléments cruciaux dans la démarche.
- La démarche proposée permet de rationaliser l'échantillonnage d'un site dont la pollution présente une certaine continuité spatiale. Elle sera inefficace si le phénomène de pollution n'est pas structuré, c'est-à-dire s'il présente un effet de pépite pur (répartition purement aléatoire des teneurs). Sans corrélations spatiales à exploiter, le seul avantage des méthodes géostatistiques par rapport à des méthodes statistiques plus classiques est de permettre de quantifier l'incertitude associée aux cartographies produites.

Classement des mailles de terres en fonction de l'avancée de la campagne d'investigations.

AVANTAGES – INCONVÉNIENTS – MATURITÉ DE LA TECHNIQUE

AVANTAGES

Investigations

- Augmentation du nombre de mesures,
- Numérisation immédiate des données collectées (transferts de données et erreurs de saisie réduites),
- Meilleur positionnement des points d'investigations,
- Campagne d'investigations unique possible.

Polluants

- Utilisable avec l'ensemble des polluants (selon l'appareil de mesure de terrain),
- Utilisation possible d'informations indirectes sur l'état de pollution des sols.

Influence sur les résultats et incertitudes

- Quantification des incertitudes des résultats de la modélisation géostatistique.

Résultats et interprétation

- Outil d'aide à la décision et d'appui à la communication,
- Résultats en temps réel ou quasi-temps réel.

INCONVÉNIENTS

Investigations

- Campagne de terrain plus longue et donc plus onéreuse.

Données

- Importance de données de qualité et homogènes,
- Importance de données d'entrée géolocalisées.

Matériel

- Besoin de matériel de terrain adapté, connecté et permettant des analyses fiables (limites de quantification faibles, reproductibilité),
- Besoin d'une bonne gestion de la recharge des batteries.

Résultats d'interprétation

- Besoin de personnel formé à la géostatistique pour préparer et suivre les campagnes de reconnaissance,
- Vigilance à conserver pour les représentations (codes de couleur, gammes de teneurs représentées au risque d'une vision erronée de la situation).

MATURITÉ DE LA TECHNIQUE



R&D aboutie, interfaces et logiciels développés ou en cours de développement, technique utilisée sur le terrain

DÉLAIS DE MISE EN ŒUVRE

La durée de la phase sur site est optimisée. Les traitements géostatistiques sont réalisés automatiquement à l'entrée des nouvelles données ou de manière différée en fin de journée. Des phases de préparation de l'étude préalable au terrain et de traitement final de l'ensemble des données par une

personne formée à la géostatistique sont également à prendre en compte. La durée de la campagne dépend du site, de l'étude et de l'outil de mesure de terrain. Elle peut varier entre quelques jours et plusieurs semaines.

PHASE

ACQUISITION DU MATÉRIEL

CAMPAGNE D'INVESTIGATIONS (PAR ÉCHANTILLON)

Délai associé

-



⌚: jour / ⌚⌚: semaine / ⌚⌚⌚: mois

ÉLÉMENTS DE COÛTS

De même que pour les délais, les coûts liés à la campagne de terrain dépendent principalement de l'outil de mesure de terrain utilisé. Les coûts d'acquisition ou de location du matériel pour collecter les données et les traiter (ordinateur,

tablette, logiciel) sont de quelques milliers d'euros. Bien que certains traitements soient automatiques, il convient d'intégrer le coût de préparation et de validation des résultats par une personne formée à la géostatistique.

PHASE

ACQUISITION DU MATÉRIEL

CAMPAGNE D'INVESTIGATIONS (PAR ÉCHANTILLON)

Coût associé

€€€

€€€

€ < 100 € / €€ < 1000 € / €€€ > 1000 €

POUR EN SAVOIR PLUS - RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] *Reconnaissance assistée de sites pollués par l'utilisation conjointe de mesures rapides sur site et de traitements géostatistiques - Conception et validation d'une démarche itérative de reconnaissance - Rapport final REPERAGE, Novembre 2008*

[2] *Projet FUI « MATRICE » : Outil de prospection intégré et d'analyse en temps réel pour améliorer les diagnostics - Novembre 2008 et présentation du projet aux 4^{èmes} rencontres de la recherche sur les sites et sols pollués - Calcul de plans d'échantillonnage rationalisés pour la conduite de campagne de reconnaissance, Novembre 2019, p41*

[3] *Présentation du projet Esopol aux 4^{èmes} rencontres de la recherche sur les sites et sols pollués - Développement et intégration d'un outil de traitement géostatistique dans un analyseur portable LIBS portable, - Novembre 2019, p317 et Vidéo de description du projet*