

La transition énergétique  
en actions

P. 1

**ACTUALITÉ**

La géostatistique pour interpréter les données de pollution des sols

P. 3

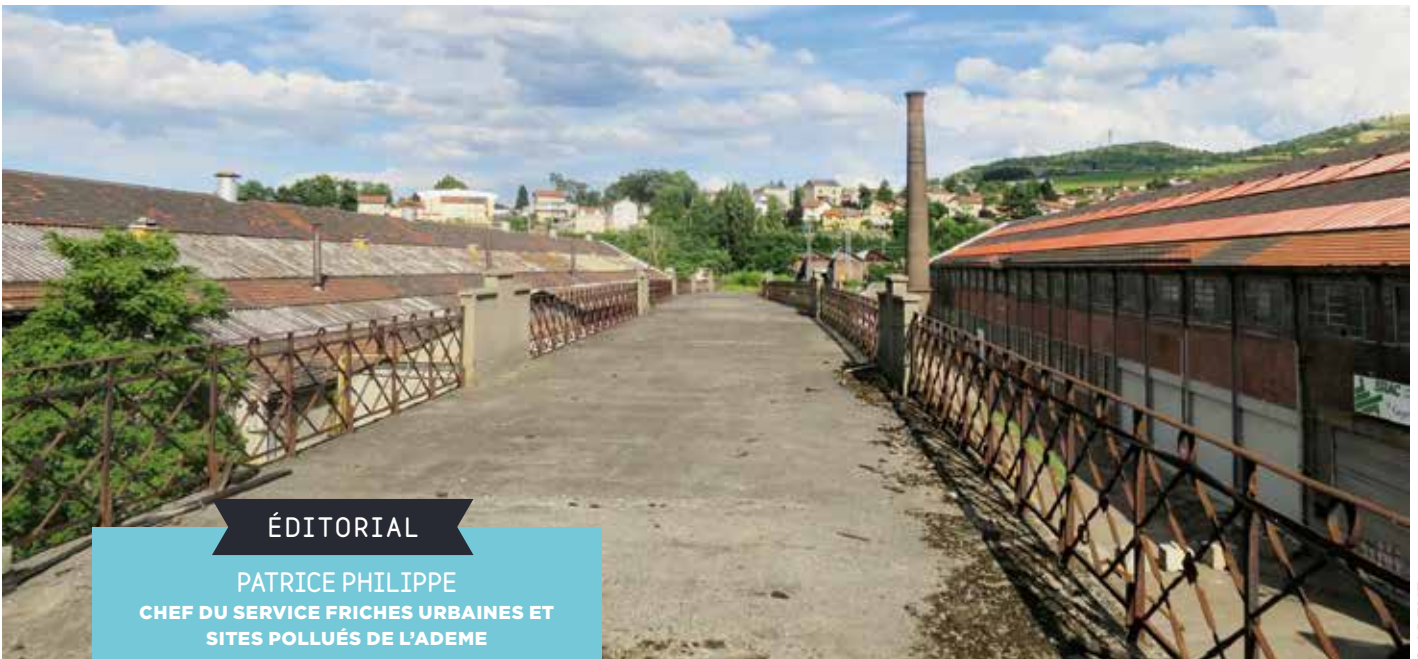
**RÉSULTATS SIGNIFICATIFS**

Optimiser la gestion des sites et sols pollués avec la géostatistique

P. 5

**RENCONTRE AVEC...**

Hélène Roussel et Hélène Demougeot-Renard : « Cartographier les teneurs habituelles des contaminants dans les sols urbains »



**ÉDITORIAL**

**PATRICE PHILIPPE**  
CHEF DU SERVICE FRICHES URBAINES ET SITES POLLUÉS DE L'ADEME

Initialement développée pour les besoins de l'industrie minière, la géostatistique est utilisée par de nombreux secteurs, dont celui des sites et sols pollués. L'ADEME, en soutenant depuis quinze ans des recherches à la fois sur la méthode et sur sa mise en application, a contribué à son développement en France. Depuis les années 2000, de nombreuses études géostatistiques ont ainsi été menées avec succès sur des sites industriels contaminés, permettant à la géostatistique de gagner en notoriété et en crédibilité. Les bureaux d'études se sont approprié cette méthode, permettant de mieux mettre en lumière ses avantages et limites, pour l'inscrire peu à peu dans les documents officiels relatifs à la gestion des sites et sols pollués. La journée du 23 janvier 2019 (cf. p. 4), organisée en partenariat avec RECORD et avec le soutien de l'association GéoSiPol, sera l'occasion de faire le point sur l'aboutissement de ces travaux de recherche et sur les nouvelles perspectives, et de permettre à tous les acteurs concernés tant chercheurs que professionnels de se réunir et d'échanger.

**ACTUALITÉ**

**LA GÉOSTATISTIQUE  
POUR INTERPRÉTER  
LES DONNÉES DE  
POLLUTION DES SOLS**

*Depuis ses origines dans le secteur pétrolier, la géostatistique a trouvé progressivement des applications dans des domaines très variés. L'ADEME a contribué à son développement dans le cadre des sites et sols pollués.*

**L'ÉMERGENCE DE LA GÉOSTATISTIQUE**

Les premières recherches sur ce qui ne s'appelait pas encore la géostatistique ont débuté dans les années 1950 en Afrique du Sud grâce à Danie Krige, un ingénieur sud-africain qui a développé un modèle mathématique destiné à faciliter l'exploitation des mines d'or du Witwatersrand. Inspiré par ces premiers travaux, le polytechnicien français Georges Mathe-



ron, chercheur au BRGM, puis à l'École des Mines, établira les concepts majeurs de la géostatistique dans un cadre probabiliste, et en définira les outils fondamentaux, en particulier le « variogramme ». En hommage aux travaux fondateurs de Danie Krige, Georges Matheron nommera « krigeage » la technique d'estimation présentée dans son ouvrage *La Théorie des variables régionalisées*. Il est à l'origine de la création du centre de géostatistique de l'École des Mines en 1967.

La géostatistique désigne un ensemble de méthodes mathématiques permettant d'interpoler un phénomène variant dans l'espace et dans le temps à partir de données représentatives du phénomène, et de quantifier l'incertitude d'estimation associée. Les résultats produits sont des cartographies du phénomène ou bien encore des estimations de quantités, telles que par exemple des masses de réserves récupérables en minerais ou des volumes de sols pollués à excaver. La géostatistique constitue également un formidable outil d'analyse et de compréhension de jeux de données multiples et complexes. Ces atouts énormes de la géostatistique expliquent pourquoi celle-ci a très vite été utilisée dans différents domaines, en particulier pétrolier, afin d'aider à l'estimation des gisements. Elle a ensuite, dès les années 1970, été appliquée à l'estimation d'autres ressources, dans les domaines de la météorologie, de l'agronomie, de l'océanographie... et de la gestion des sites et sols pollués.

En France, plusieurs chercheurs s'intéressent à la question, dont l'équipe de Chantal de Fouquet à l'École des Mines. L'application de la géostatistique aux sites et sols pollués a été testée dès les années 1990. Deux thèses vont marquer un tournant au début des années 2000 : celle de Nicolas Jeannée (2001) et celle d'Hélène Demougeot-Renard (2002). Dès lors, les bases de la géostatistique appliquée aux sites et sols pollués sont établies. Restait à la rendre opérationnelle pour les acteurs de terrain.

### LE DÉVELOPPEMENT DE L'UTILISATION DE LA GÉOSTATISTIQUE

En effet, la géostatistique, issue des mathématiques, restait encore mal connue par les professionnels de la gestion des sites et sols pollués au début des années 2000, et certains demeureraient sceptiques quant à l'intérêt de son utilisation.

Pour améliorer la diffusion de cette technique, l'ADEME a soutenu la création en 2004 d'un groupe de travail national baptisé GéoSiPol ([www.geosipol.org](http://www.geosipol.org)), organisé en association loi 1901, qui regroupe des géostatisticiens, des spécialistes des sites et sols pollués et des industriels détenteurs de sites. Groupe de réflexion sur les conditions de transfert de connaissances vers la pratique, GéoSiPol a conduit à la rédaction d'un manuel méthodologique, à des études de démonstration et à l'organisation de séminaires de sensibilisation.

L'ADEME a par ailleurs cofinancé des programmes de recherche destinés à développer de nouvelles applications de la géostatistique dans le domaine des sites et sols pollués. Le programme REPÉRAGE (voir page 3) a conduit à l'élaboration d'une méthodologie pour combiner des outils de mesures rapides sur site et

des méthodes géostatistiques afin d'optimiser et d'accélérer la délimitation des zones sources et des volumes de sols à traiter. Le programme CARTORISK définit les conditions de spatialisation géostatistique des risques sanitaires, par couplage des calculs de risques sanitaires à des modèles de répartition spatiale de la pollution, dans l'objectif d'optimiser les projets de réaménagement des friches industrielles.

Les années 2010 sont marquées par une expansion des cas d'application, avec de nombreuses études géostatistiques menées sur le terrain sur d'anciennes friches industrielles. Les bureaux d'études se forment de plus en plus à cette méthode, dont les principes, les avantages et les limites sont mieux connus. La géostatistique a par ailleurs été mentionnée dans différents documents officiels relatifs à la gestion des sites et sols pollués : en 2017 dans la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués<sup>1</sup>, en 2016 dans le guide de l'Union des professionnels de la dépollution des sites sur les outils de caractérisation de pollutions concentrées ([www.upds.org](http://www.upds.org)) et en 2015 dans le guide du BRGM sur la définition d'une stratégie de dépollution par bilan de masse.

*Nous remercions Mme Hélène Demougeot-Renard pour sa collaboration à cet article.*

1. <https://www.ecologique-solaire.gouv.fr/sites-et-sols-pollues>

 > [helene.roussel@ademe.fr](mailto:helene.roussel@ademe.fr)

### Zoom sur...

#### ÉTAT DE L'ART ET ÉTUDES DE CAS DE DÉPOLLUTION DE SITES

L'association RECORD, réseau coopératif de recherche sur les déchets et l'environnement ([www.record-net.org](http://www.record-net.org)), dont les programmes sont soutenus par l'ADEME, a financé deux études destinées à mener un retour d'expérience critique sur l'utilisation de la géostatistique en conditions opérationnelles. La première a permis de dresser un état de l'art sur le sujet et à fournir des recommandations pour favoriser l'utilisation de ces techniques en 2013. La seconde, en 2016, a

consisté en une analyse détaillée de 23 cas de dépollutions de sites industriels, représentatifs des situations fréquemment rencontrées, où se posait la question d'estimer les quantités de terres à traiter. Sur ces cas, l'utilisation de la géostatistique est apparue comme un atout pour réduire les erreurs d'estimation des quantités à dépolluer, pour autant que la modélisation des zones polluées ait été réalisée dans les règles de l'art.

# OPTIMISER LA GESTION DES SITES ET SOLS POLLUÉS AVEC LA GÉOSTATISTIQUE

*Au terme de quinze ans de soutien de la recherche sur ce sujet, l'ADEME continue à développer des avancées techniques, mais aussi à promouvoir l'usage de la géostatistique pour la gestion des sites pollués. Développement d'un sujet « tout en couleur ».*

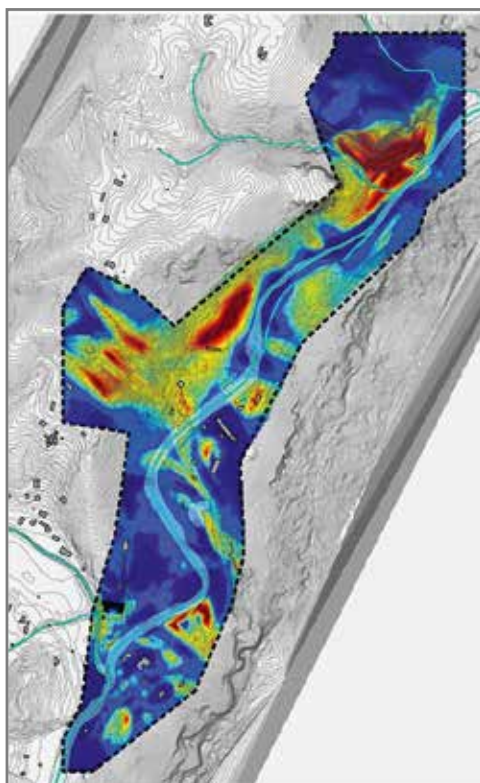
Les enjeux de l'utilisation de la géostatistique pour la gestion des sites pollués sont à la fois économiques et environnementaux.

## ANALYSER RAPIDEMENT SUR SITE

Un des principaux atouts de la géostatistique concerne la gestion rapide des données. Le prélèvement d'échantillons sur un site potentiellement pollué et l'analyse de leur teneur en contaminant chimiques sont des opérations coûteuses. Aussi le nombre de données disponibles pour la caractérisation d'un site est-il toujours limité. Le programme de recherche REPÉRAGE a permis de mettre en œuvre simultanément des outils de mesures rapides sur site et des méthodes géostatistiques.

Dans ce programme, l'utilisation d'un spectromètre portable à fluorescence de rayons X (pXRF) a permis de fournir beaucoup de données en un temps très court (plusieurs centaines en 5 jours). Les échantillons sont collectés durant la journée, les informations transmises au géostatisticien le soir même pour une mise à jour du modèle géostatistique et la fourniture du positionnement optimisé des échantillons à collecter le lendemain. La démarche permet de réduire au maximum l'incertitude sur les estimations de volumes et de coûts de dépollution associés grâce à l'optimisation du positionnement des échantillons de sols au fur et à mesure de l'avancement du diagnostic de site. Par rapport à une approche standard sans géostatistique ni mesure sur site, il permet de

> Carte de prédiction des teneurs en arsenic sur un site à responsable défaillant géré par l'ADEME (en mg/kg) en suivant la méthodologie REPÉRAGE.



mieux délimiter les volumes de sols pollués et de faciliter de façon significative l'aide à la décision et la communication auprès des différentes parties prenantes impliquées dans un dossier. Cette technique est maintenant utilisée dans la gestion des sites pollués. Elle a par exemple été appliquée par le bureau d'études ESTIMAGES (en collaboration avec TESORA et EAUGEO) pour la cartographie des métaux dans les sols d'une ancienne zone de traitement des minerais dans le Gard.

Le projet ESOPOL s'inscrit lui aussi directement dans cette thématique. Il a pour objectif d'intégrer un module géostatistique au logiciel interne d'un appareil portable

LIBS (spectroscopie sur plasma induit par laser). Cela permet, en temps réel et sur le site, d'établir une cartographie semi-quantitative des polluants métalliques au fur et à mesure de l'acquisition des mesures. L'intégration d'un tel outil de traitement dans un analyseur de terrain portable permettra d'orienter au mieux les opérations de diagnostic de sites pollués, sans se substituer aux dispositifs de laboratoire mais en permettant de mieux orienter les opérations d'échantillonnage afin de limiter le nombre d'échantillons à analyser en laboratoire et donc les coûts et les délais de ces analyses.

En parallèle de l'intégration de la géostatistique dans les outils de terrain, l'ADEME soutient des projets de recherche visant à améliorer les techniques géostatistiques, en particulier pour résoudre des problèmes de valeurs fortement



© ADEME

contrastées, ce qui est le cas de nombreuses pollutions organiques. Ainsi, de très fortes concentrations à certains endroits peuvent fortement perturber la modélisation du site, et rendre moins fiable la délimitation des zones présentant des concentrations élevées. Une pratique empirique des bureaux d'études pour contourner ces problèmes consiste à rabattre les valeurs fortes à une valeur inférieure, afin de rendre plus réalistes les cartes de concentrations estimées. Mais ce « tour de main » modifie les données, et par conséquent les concentrations estimées ainsi que l'extension de la zone délimitée comme polluée. Le projet CONTRASOL (estimation géostatistique de pollution fortement contrastée dans les sols) a eu pour objet d'examiner l'application d'un modèle d'écrêtage à l'estimation de pollutions organiques pour analyser la « robustesse » des résultats qui en découlent. Dans les deux sites étudiés, le modèle a su démontrer sa meilleure efficacité par rapport aux techniques utilisées empiriquement par les bureaux d'études ou les autres méthodes de calcul existantes.

### CARTOGRAPHIER LES RISQUES

La reconversion des friches issues du passé industriel représente des opportunités de renouvellement urbain pour les collectivités. Mais la programmation et la conception des réaménagements doivent intégrer de multiples critères, dont la gestion du passif environnemental. Le projet CARTORISK a eu pour objectif de développer une démarche facilitant la recherche d'un meilleur compromis de réaménagement sous l'angle de la pollution et de sa gestion dans le cadre légal en vigueur. La démarche de spatialisation des risques sanitaires développée permet de produire différentes représentations : des cartes d'opportunités de réaménagement et des cartes de risques en fonction des variantes spatiales de réamé-

> Utilisation d'un appareil de mesure portable (pXRF) couplé à la géostatistique pour réaliser la cartographie des polluants sur un site à responsable défaillant géré par l'ADEME.

nagement. Ces cartes constituent également un outil de communication, pour mettre en avant l'effet de mesures de gestion de la pollution sous l'angle du risque et de manière intégrée.

Dans ce projet, l'utilisation de modèles géostatistiques permet d'intégrer l'incertitude induite par la connaissance lacunaire de la pollution et par la complexité de sa répartition dans les sols et les eaux souterraines. Elle permet d'identifier les secteurs où un échantillonnage complémentaire serait bénéfique pour décider de la reconversion de sites avec un meilleur niveau de confiance, et donc un moindre « risque » dans la prise de décision.

La démarche de CARTORISK est un outil complémentaire aux outils recommandés par la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués révisée en 2017. Elle trouve en effet son intérêt à différents stades de la méthode tout en répondant aux besoins évolutifs du maître d'ouvrage dans le processus de reconversion. Les développements de CARTORISK sont ainsi pertinents à l'étape de définition des objectifs de réhabilitation et d'analyse des scénarios de gestion de la pollution, en permettant leur comparaison sous l'angle des risques sanitaires, tout en tenant compte des scénarios de réaménagement envisagés. La démarche peut également être déployée dans l'analyse des risques résiduels, au stade où l'acceptabilité des risques sanitaires résiduels après réhabilitation doit être montrée et argumentée.

> [helene.roussel@ademe.fr](mailto:helene.roussel@ademe.fr)

*aller + loin*

### PARTAGER SON RETOUR D'EXPÉRIENCE

Une journée technique à vocation très opérationnelle est organisée le 23 janvier 2019 par l'ADEME, en partenariat avec le réseau RECORD et avec le soutien de l'association GéoSiPol. L'objectif principal de cette journée : le retour d'expérience des maîtres d'ouvrage, des bureaux d'études et des géostatisticiens. L'analyse des succès mais aussi des échecs de certains projets utilisant la géostatistique a pour but de faire avancer la technique en mutualisant les réflexions. La journée sera rythmée par des séquences correspondant aux besoins opérationnels en géostatistique pour la gestion des sites et sols pollués (diagnostics, risques, plan de gestion, travaux, cessions et aménagement de site). Pour plus d'informations, rendez-vous sur le site : <http://geostatistique-sites-pollues.site.ademe.fr>

## RENCONTRE AVEC...

**HÉLÈNE ROUSSEL**  
CHEF DE PROJETS SITES ET  
SOLS POLLUÉS À L'ADEME



**HÉLÈNE DEMOUGEOT-RENARD**  
FONDATRICE ET DIRECTRICE  
DU BUREAU EODE



## AGGLOMÉRATIONS

## « CARTOGRAPHIER LES TENEURS HABITUELLES DES CONTAMINANTS DANS LES SOLS URBAINS »

*Alors que les valeurs de fonds des sols agricoles et forestiers ont déjà fait l'objet de cartographies nationales réalisées par l'INRA, celles des milieux urbains restent encore peu connues. Pour combler cette lacune, l'ADEME a mis en place, dès 2014, un groupe de travail spécifique. Les travaux de recherche pourraient bientôt aboutir à une méthodologie permettant même d'automatiser la cartographie des valeurs de fonds des agglomérations.*

### Qu'appelle-t-on des « valeurs de fonds » ? Quels travaux l'ADEME mène-t-elle sur le sujet ?

**Hélène Roussel :** Les valeurs de fonds sont les teneurs en éléments chimiques que l'on trouve habituellement dans les sols. On parle ici de métaux, mais aussi de produits organiques de synthèse résultant souvent d'activités humaines. Entendons-nous bien : il ne s'agit pas d'une pollution issue d'une source précise, mais bien de teneurs chimiques relativement habituelles dans les sols d'un territoire donné, qu'il soit urbain ou agricole.

Le groupe de travail national que nous pilotons, en collaboration notamment avec le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), a identifié un gros verrou : la faible connaissance sur les niveaux de base en polluants dans les sols urbains. Cela nécessite donc des travaux de recherche reposant sur la géostatistique qui permet de gérer en 3D un grand nombre de données.

**Le cabinet eOde fait partie de ce groupe de travail et aborde les valeurs de fonds sous l'angle de la géostatistique. En quoi consiste cette approche ?**

**Hélène Demougeot-Renard :** Il s'agit d'analyser et d'interpréter un ensemble de données à partir d'outils mathématiques pour réaliser une cartographie du phénomène caractérisé par les données en question. Prenons un exemple : pour caractériser un fond urbain à l'échelle d'une ville, nous allons rassembler et collecter des données (en l'occurrence, des échantillons du sol analysés en laboratoire). Par nature, ces données restent limitées en nombre (de l'ordre d'une ou de quelques centaines de données pour une agglomération, globalement). Il est donc indispensable d'utiliser des méthodes qui permettront de prédire

ce qui se passe entre les points de données connus afin d'obtenir une cartographie qui complète les valeurs de fonds et qui indique le plus précisément possible l'état du sol sur le territoire observé.

### Quels sont les atouts de ces cartographies ?

**H. D.-R. :** Dans la mesure où elles s'appuient sur des données de bonne qualité, ces cartographies reflètent la réalité du terrain. Par ailleurs, on y associe une incertitude : par exemple, si nous n'avons que 10 données sur 10 km<sup>2</sup>, l'incertitude de la cartographie sera beaucoup plus grande que si l'on peut s'appuyer sur un millier de données. Cette incertitude donne de la valeur à la carte en précisant les zones nécessitant un ré-échantillonnage ou en chiffrant le risque de se tromper. Enfin, l'analyse statistique et géostatistique des données nous permet de fournir des éléments de compréhension sur l'origine et la répartition des éléments chimiques repérés.

### Quelles sont les spécificités des sols urbains par rapport aux terres agricoles ?

**H. D.-R. :** La répartition des éléments dans les sols agricoles est relativement

### Bia express

Ingénieur géologue et docteur en sciences naturelles, Hélène Demougeot-Renard est experte dans le domaine des sites pollués ainsi qu'en géostatistique. En 2010, elle crée le bureau de conseils eOde. Spécialiste des sites et sols pollués et de l'analyse statistique et géostatistique des données environnementales, eOde accompagne de nombreux organismes publics et privés sur des activités d'expertise technique, scientifique et réglementaire.

« homogène », dans le sens où la pollution y a été disséminée de manière plutôt diffuse. En revanche, la situation en milieu urbain est complexe : on y trouve des remblais, des terres naturelles déplacées, des matériaux de construction, bref, un sol très hétérogène où les éléments sont également répartis de manière très variable. Par ailleurs, nous travaillons souvent avec des échantillons collectés dans le cadre d'études antérieures : nous ne maîtrisons donc ni le schéma d'échantillonnage, ni la qualité de ces données ce qui, bien sûr, complique significativement les choses.

### Comment obtient-on les données à partir desquelles les cartographies seront réalisées ?

**H. R. :** Ces données sont obtenues soit en faisant des prélèvements de sol, soit en rassemblant dans un fichier unique des données répertoriées dans différents documents. Dans tous les cas, l'acquisition de la donnée est chronophage et coûteuse ; c'est pourquoi nous souhaitons la mutualiser afin que les données acquises par les uns profitent aux autres. Pour cela, et en partenariat avec le BRGM, nous avons développé la base de données des sols urbains nommée BDSolU, qui communiquera avec celle de l'INRA, consacrée plutôt aux terres agricoles et forestières. Les bureaux d'études et les collectivités qui alimenteront BDSolU y trouveront un bénéfice puisque, en échange de la mise à disposition de leurs données, nous leur fournirons des cartographies, des analyses, des statistiques qu'ils n'auraient peut-être pas pu faire en interne. J'en profite pour rappeler que la géostatistique permet d'intervenir sur des territoires plus grands, comme le montre le projet GeoBaPa mené sur la vallée de la Seine où, cette fois, les cartographies de valeurs de fonds sont réalisées non à l'échelle d'une agglomération, mais à celle de plusieurs régions.

*« Cartographeur  
les valeurs de fonds dans  
les sols permet de mieux  
valoriser les terres  
excavées lors de chantiers  
d'aménagement. »*

### Vous allez prochainement travailler sur les cas concrets de Toulouse et du Grand Lyon : techniquement, que pensez-vous du choix de ces agglomérations ?

**H. D.-R. :** Ce choix est très intéressant car il met en regard une agglomération proactive (le Grand Lyon) qui a rassemblé plusieurs milliers de points d'échantillonnage collectés depuis plusieurs années, et une commune qui débute dans cette démarche, et ne dispose que de 100 ou 200 points. Or ces situations sont représentatives de ce qui sera observé à l'échelle du territoire français. À chaque fois, il s'agira de tester notre méthodologie qui doit permettre de traiter les données en vue d'obtenir – quel que soit le contexte – une cartographie de valeurs

de fonds pertinente.

Cette expérimentation nous permettra par ailleurs de voir dans quelles conditions des tâches que nous sommes pour l'heure tenus de faire manuellement pourraient être automatisées.

### En quoi les cartographies de valeurs de fonds sont-elles utiles aux agglomérations ?

**H. R. :** Ces cartographies leur permettent notamment de mieux valoriser les terres excavées lors de chantiers réalisés sur des sites pollués : plutôt que d'envoyer les sols excavés en décharge et d'en racheter d'autres sur d'autres chantiers, les agglomérations peuvent, grâce à ces cartographies, les reclasser à des endroits qui présentent les mêmes valeurs de fonds. Le principe est de ne pas dégrader la qualité chimique du site receveur en respectant les valeurs de fonds. Les cartographies réalisées grâce à la géostatistique les aident donc à mieux gérer leur sol d'un chantier à l'autre et, in fine, à faire des économies substantielles.

 > [helene.roussel@ademe.fr](mailto:helene.roussel@ademe.fr)

## APPELS À PROJETS

### IMPACTS

SÉMINAIRE DE LANCEMENT  
LE 22 MARS 2019

L'appel à projets de recherche (APR) IMPACTS vise à mieux connaître l'impact des mélanges de polluants sur l'homme. Les 7 projets de recherche sélectionnés porteront sur les domaines d'intervention de l'ADEME : la réduction des impacts du traitement des déchets, la réhabilitation des sols pollués, la préservation de la qualité de l'air (extérieur et intérieur) et la réduction des émissions des transports.

### TEES

TRANSITIONS ÉCOLOGIQUES,  
ÉCONOMIQUES ET SOCIALES

L'appel à projets de recherche TEES est dédié aux sciences humaines et sociales (SHS) et se veut transversal aux différents champs d'action de l'ADEME. Dans la continuité de l'édition précédente, cet APR a pour objectif d'apporter des connaissances théoriques, stratégiques et pratiques aux acteurs, aussi bien publics que privés, souhaitent faire évoluer leurs capacités organisationnelles et adaptatives, ainsi que leurs pratiques opérationnelles vers plus de durabilité et de résilience climatique, à court, moyen et long terme. La production de ces connaissances aboutira à la formulation de recommandations de politiques publiques et/ou à l'identification de bonnes pratiques et d'enseignements pour les différentes catégories d'acteurs listés précédemment.

<https://appelsaprojets.ademe.fr/aap/TEES2018-90-1#resultats>

## APPEL À COMMUNICATIONS

26 ET 27 NOV. 2019

### 4<sup>es</sup> Rencontres de la recherche sur les sites et sols pollués

Le présent appel à communication vise à sélectionner les présentations qui seront présentées par communication orale, par poster ou par vidéo en 180 s.

<https://appelsaprojets.ademe.fr/aap/RNR%20SSP2018-76#resultats>