

Acierie en activité à Resita (Roumanie)  
© BRGM/VALÉRIE GUÉRIN

## SITES ET SOLS POLLUÉS

# Le grand nettoyage

**Deux siècles d'industrialisation** ont laissé des traces dans le sol : une impressionnante liste de polluants de toutes sortes – solvants, métaux et métalloïdes, huiles minérales, composés organiques, pesticides, produits pharmaceutiques et leurs métabolites... Ces polluants sont diffusés dans l'air, dans les eaux souterraines, sont absorbés par les plantes, les animaux et par l'homme, mettant en jeu sa santé.

Ce seul fait milite pour une décontamination des sites. Mais ce n'est pas tout : à cause du danger qu'ils présentent, tous ces sites pollués – quelque 3 millions en Europe – sont inutilisables tels quels. Autant de surface perdue, à moins d'une réhabilitation *ad hoc*. L'enjeu est d'autant plus important que nombre de sites pollués se trouvent en zone urbaine où la pression foncière est extrêmement forte.

Bref, si la nécessité de « nettoyer » les sites pollués s'impose, l'opération est beaucoup plus délicate qu'il n'y paraît. Elle soulève de nombreux défis scientifiques. Avant de songer à décontaminer d'une façon économique, il est en effet primordial de mieux comprendre encore les phénomènes complexes mis en jeu. Il s'agit non seulement de mieux caractériser les polluants présents en un lieu, mais également de mieux connaître leur comportement, leur évolution, et de mieux évaluer leur impact réel sur la santé et l'environnement. Il est ensuite indispensable d'améliorer les techniques de dépollution et de gestion proprement dites, en faisant appel à une panoplie d'outils physiques, chimiques aussi bien que biologiques. Tous ces défis mobilisent les chercheurs de différentes disciplines au sein d'une multitude de programmes de recherche. ■

> P. 2  
Des milliers  
d'hectares à revaloriser

> P. 5  
Panorama  
de la recherche

> P. 6  
Des défis  
tous azimuts

> P. 11  
Innovations,  
technologies

Cahier réalisé en partenariat avec :



# Des milliers d'hectares à revaloriser

La santé des populations, liée à la volonté de réutiliser les sites pollués à des fins foncières, justifie la volonté de remédiation des sites et des sols contaminés par l'activité anthropique.

**Quels que soient les progrès** de la réglementation en matière de rejets industriels, ils ne peuvent effacer la contamination des sols par des polluants résultant de plus de deux siècles d'industrialisation intensive et, longtemps, fort peu précautionneuse. On estime ainsi qu'en Europe, quelque 3 millions de sites sont potentiellement concernés, dont approximativement 250 000 nécessitent une remédiation urgente. En France, selon les bases de données du BRGM (Bureau de recherche géologiques et minières), 300 000 à 400 000 sites, pour une superficie d'environ 100 000 hectares, sont sujets à caution alors qu'un peu plus de 4 000 d'entre eux ont été identifiés comme justifiant une intervention rapide.

Quels contaminants sont présents dans les sols et dans le sous-sol et les aquifères (on parle alors de « site » pollué) ? Une impressionnante variété, aussi diverse que les activités humaines et les produits qu'elles utilisent (ou utilisaient) : métaux et métalloïdes, huiles minérales, composés organiques et leurs métabolites tels que les solvants, les pesticides et les produits pharmaceutiques... La liste est interminable. Toutefois, les plus fréquemment rencontrés sont les hydrocarbures qui représentent à eux seuls 33 % des polluants présents dans le sol et dans l'eau. Suivent de près les métaux et métalloïdes avec respectivement 25 % et 22 %.

## OPÉRATION NETTOYAGE

La volonté de « nettoyer » les sols pollués a deux motivations principales. La première est la santé des populations. Même si les recherches sur les effets sur la santé d'une exposition chronique à un sol pollué sont relativement récentes et nécessitent encore de nombreux travaux, un lien a été établi entre la pollution des sols et la santé. Ainsi, l'exposition à l'arsenic ou à l'amiante peut être cause de cancers, celle au plomb, mercure ou cadmium peut provoquer des maladies rénales ou, encore, des troubles du système nerveux pourraient résulter de l'exposition au plomb, par exemple. À noter que cet élément est également responsable du saturnisme. Cela dit, le problème est complexe, d'autant que les voies de passage dans l'organisme sont multiples : ingestion de terre (fréquente chez des enfants de moins de 3 ans), inhalation de l'air ou de poussières, passage transcutané et absorption indirecte via l'ingestion de plantes, de viande ou



Requalification de la friche de l'Union (Nord-Pas-de-Calais, France).



Prairie développée sur des remblais industriels (Nord-Pas-de-Calais, France).

© BRGM/COUSSY SAMUEL

© BRGM/COUSSY SAMUEL

d'eau contaminées. Ce sont en tout cas autant de raisons de prévenir et limiter la dissémination des substances toxiques via ces différents vecteurs.

Parallèlement aux enjeux de santé liés à l'amélioration de la qualité des sols (et des eaux), un autre enjeu majeur explique la volonté de remédiation des sols pollués : la réutilisation foncière des friches polluées, inutilisables en l'état. C'est une ressource considérable dont il est impératif de profiter, d'autant que de très nombreux sites se trouvent en zone urbaine. Cette valorisation vise à la fois à lutter contre l'étalement urbain et à réduire la surconsommation d'espace (nouveaux aménagements et infrastructures de transports associées) et d'énergie (notamment liée aux transports des biens et des personnes sur de plus grandes distances). Elle permet en outre de préserver les autres ressources foncières (zones agricoles, forestières et naturelles). La réaffectation des sols autorise enfin la mise en place de nouvelles activités



*Carotte de sol contaminée  
aux hydrocarbures pétroliers  
sur un ancien site  
de recyclage d'huiles.*

© I. DECLERCO/ADEME

## SEPT GRANDES FAMILLES DE POLLUANTS

**La fréquence de la présence de polluants observée sur 2 500 sites répertoriés dans la base de données BASOL du BRGM est la suivante :**

- les benzène, toluène, éthylbenzène et xylène (BTEX) [3,4% des cas recensés] ;
- les cyanures [6,6%] ;
- les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) [27,5%] ;
- les hydrocarbures [61,4%] ;
- les hydrocarbures chlorés

- (PCB-PCT, produits organiques polychlorés, solvants halogénés – TCE, trichloréthylène – 31,5% ) ;
- les métaux et métalloïdes (arsenic, baryum, cadmium, chrome, cobalt, cuivre, mercure, molybdène, nickel, plomb, sélénium, zinc, 47,9% ) ;
- les autres contaminants (ammonium, chlorures, pesticides, solvants non halogénés, sulfates, 9,6% ).

rous scientifiques, technologiques et réglementaires sont elles aussi très étendues. Depuis l'estimation de l'effet sur la santé, en passant par la compréhension de la mobilité des polluants et de leur transformation dans les sols jusqu'à la mise au point de techniques plus efficaces de diagnostic et de dépollution, la recherche ne manque pas de défis à relever (voir pages 6 à 10).

Il y a un autre défi, économique celui-là. Dépolluer coûte cher. L'Agence européenne pour l'environnement estime son coût annuel à 6,5 milliards d'euros en Europe. Pour cette raison, différents scénarios sont envisagés par l'ADEME dans sa feuille de route sur « La gestion intégrée des sols, des eaux souterraines et des sédiments pollués », à l'horizon 2050. Point commun à toutes les approches, cependant, un très grand pragmatisme. Pas question de dépolluer totalement tous les sites, car infaisable tant au niveau économique que technique. La priorité est toujours d'éradiquer la source de pollution, sinon de couper les éventuelles voies de transfert dans les milieux et de traiter la pollution diffusée. Le niveau de dépollution à atteindre est, quant à lui, défini en évaluant les impacts sur la santé humaine et l'environnement par rapport à l'usage prévu pour le site en question (ou, inversement, le niveau de dépollution atteignable économiquement détermine d'éventuelles restrictions d'usage). En clair, aux deux extrêmes, la construction d'un parking n'exigera pas les mêmes efforts en termes de dépollution que celle d'une crèche. Dans le premier cas, la couverture de la zone (inertage) permet de limiter les efforts de dépollution dans le cas où la contamination n'atteint pas la nappe phréatique. Dans le second, aucun compromis n'est envisageable... Cette approche est celle élaborée par le ministère en charge de l'Environnement, en France, qui met en place les différents outils nécessaires à son application (guides méthodologiques, organisation de journées techniques, procédures de certification des entreprises de dépollution...).

ou de nouveaux services (logements, commerces, espaces verts...) intégrés dans des projets d'urbanisme plus vertueux du point de vue de l'environnement (éco-quartiers) Enfin, les friches industrielles peuvent être à l'origine de nombreux services comme, par exemple, la production de biomasse à usage industriel.

### DES TRAITEMENTS SPÉCIFIQUES AUX SITES

Dans ces conditions, la remédiation des sols pollués semble aller de soi. Il y a toutefois loin de la coupe aux lèvres. D'abord, parce que le problème est extrêmement complexe. Le nombre de polluants différents et l'impact variable de chacun selon la nature des sols, extrêmement variable elle aussi, fait que chaque site est quasi unique, demandant ainsi la mise en œuvre de toute une palette de solutions. Ensuite, les connaissances à mobiliser pour mieux comprendre les phénomènes en jeu et lever les ver-

## L'INFLUENCE DES POLLUANTS SUR LE VIVANT

Deux termes sont utilisés pour rendre compte du transfert des polluants du sol sur les organismes humains et, plus généralement, sur le vivant : **LA BIOACCESSIBILITÉ** d'un polluant est la proportion de contaminant assimilable par l'organisme. On parle souvent de bioaccessibilité orale. Autrement dit de concentration des contaminants dans le liquide gastrique ou intestinal. La bioaccessibilité contrôle de façon significative la biodisponibilité. **LA BIODISPONIBILITÉ** est la fraction de la dose

environnante qui est absorbée et atteint la circulation systémique. C'est donc la proportion de contaminants disponibles pour le vivant (homme, flore, faune...) par rapport à la concentration totale dans le milieu. Plus précisément, c'est le degré auquel des substances chimiques présentes dans le sol peuvent être absorbées ou métabolisées par un récepteur humain ou écologique, ou être disponibles pour une interaction avec les systèmes biologiques.



Découverte de fûts enterrés sur un ancien site de recyclage d'huiles.

À moyen et long terme, les scénarios envisagés par la feuille de route de l'ADEME donnent en tout cas une bonne vision de la façon dont se pose la problématique de la dépollution des sites. Veut-on « dépolluer pour renouveler » (scénario 1), autrement dit obtenir un état des sols adapté à un usage futur défini et financé par les acteurs impliqués à la gestion du site ? Est-il préférable de « maîtriser les impacts sans dépolluer » (scénario 2) ? Il n'y a pas dans ce cas de pression foncière et donc d'usage défini au préalable pour les sols, et les coûts seraient supportés par la société. Troisième scénario possible : « dépolluer pour contribuer à la

ville durable ». Ce cas correspond à la volonté de maintenir un plus grand choix d'usages des sols avec un financement assumé par le seul usage du site. Dernière possibilité, celle de la « réhabilitation multifonctionnelle » correspondant à un usage plurifonctionnel des sols avec des coûts supportés par la société. L'ADEME reconnaît que définir ainsi le champ des possibles est « parfois caricatural et que la réalité, en 2050, sera très probablement une combinaison de ces scénarios ».

Reste que cet exercice a le mérite de mettre en évidence les leviers – financiers, réglementaires, technologiques... – à activer pour parvenir au résultat voulu, sachant que, selon les cas, le type de zones à dépolluer (rurales, urbaines...), les acteurs impliqués, le mode de financement et même les technologies mises en œuvre peuvent différer significativement. La loi ALUR devrait ainsi permettre à des acteurs de l'aménagement et de la construction d'assurer une gestion intégrée des projets, de l'achat du terrain à sa dépollution jusqu'au projet immobilier.

## LE MARCHÉ DE LA DÉPOLLUTION

L'autre versant économique de l'affaire est le marché que représente la dépollution des sites pour les entreprises françaises, aussi bien sur le territoire national qu'à l'exportation. Il est en forte croissance depuis 2000. En France, selon le service de l'Observation et des Statistiques du ministère de l'Environnement, la réhabilitation des sites et sols pollués pesait moins de 200 millions d'euros en 2000. Elle approchait les 500 millions d'euros en 2010 et a, depuis, largement dépassé ce chiffre.

Le marché des prestataires de dépollution est dominé par un noyau d'entreprises spécialisées, regroupées notamment au sein de l'UPDS (Union des professionnels de la dépollution des sites). Cette dernière compte 42 membres, parmi lesquels des filiales de grands groupes du secteur de l'environnement et de la gestion des déchets, tels que Séché Environnement, Suez Environnement et Veolia, ou du secteur de l'aménagement urbain, tels que Bouygues Bâtiment, Vinci et Colas. Le chiffre d'affaires des adhérents de l'UPDS s'élevait à 410 millions d'euros en 2013.

En 2003, pour faire entendre la voix des petites entreprises et des petits bureaux d'études de l'environnement, s'est créée l'UCIE (Union des consultants et ingénieurs en environnement) qui compte, elle, une cinquantaine de membres, dont la majeure partie travaille sur la problématique de la pollution des sites et des sols. À elles deux, ces entités réunissent plus des deux tiers des entreprises actives en France sur ce thème.

Ces entreprises sont actuellement fortement concurrencées sur le marché national par des entreprises étrangères. C'est notamment pour tout cela que l'ADEME souligne la nécessité d'accompagner des actions pour mieux caractériser les pollutions, leurs transferts et leurs risques, via l'appel à projets de recherche GESIPOL, le développement technologique de solutions de traitement jusqu'à leur démonstration sur site, via les Investissements d'avenir, et la réalisation d'opérations exemplaires dans le cadre de soutien à la reconversion des friches urbaines, par exemple. ■

# Panorama de la recherche

À tous les stades de la recherche, les chercheurs travaillent en lien étroit avec les gestionnaires de sites afin de pouvoir conduire leurs travaux sur des situations réelles et appliquées.

**En France, l'ADEME** s'investit pour orienter, animer et soutenir financièrement un très grand nombre de programmes de recherche liés à la dépollution des sites et des sols. Elle y consacre entre 1 et 1,5 million d'euros par an. Elle accompagne ensuite la valorisation des résultats à l'échelle locale, nationale ou européenne. Elle investit, par ailleurs, plus de 20 millions d'euros par an à la gestion de quelque 200 sites «orphelins», c'est-à-dire lorsque l'ancien exploitant industriel, après cessation d'activité, a été considéré comme défaillant et ne peut plus répondre aux risques environnementaux ou sanitaires générés par le site. Elle a également engagé un programme de soutien à la reconversion des friches urbaines polluées, et ce sont 122 projets pour lesquels les travaux de dépollution ont été aidés de 2009 à 2013. L'agence poursuit cet accompagnement et développe un dispositif de soutien aux études pour faciliter la collecte de données et les étapes amont de prise en compte de la pollution potentielle des sols lors de la reconversion de friches, en vue d'améliorer la maîtrise des projets.

## DES STRUCTURES DE RECHERCHE ORIGINALES

Au sein de près de 40 programmes soutenus par l'ADEME, se retrouvent les principaux spécialistes français de la recherche sur ces sujets, qui mènent par ailleurs leurs propres projets. Le BRGM en premier lieu. Bureau de recherches géologiques et minières, il est le poids lourd du domaine du sol. Il ne compte pas moins de 20 projets de recherche actuellement en cours sur le diagnostic de pollution, la gestion des sols, les techniques de remédiation... Il a également un rôle de conseil auprès des ministères pour ce qui concerne la réglementation. L'INERIS (Institut national de l'environnement industriel et des risques) est l'autre acteur majeur dans le domaine des sols pollués, au travers de ses missions en matière de risques industriels. Complémentaire du BRGM, il fournit également aux ministères son expertise, en particulier sur l'évaluation des risques liés à l'exposition aux substances chimiques présentes dans les sols pollués. De fait, il travaille sur divers volets : le diagnostic, les processus de transfert des contaminants, la bioaccessibilité et la phytoremédiation.

Il faut souligner l'existence dans le paysage français de la recherche de structures pluripartitaires, qui se retrouvent au sein du réseau de sites ateliers SAFIR. Ainsi, le GISFI en Lorraine, Groupement d'intérêt scientifique sur les friches industrielles, a-t-il été créé en 2002 par l'université de Lorraine, l'Inra, le CNRS, l'INERIS et le BRGM. Le GISFI regroupe dix



*Inventaire des fûts restant sur un ancien site de traitement de surface.*

© H. ROUSSEL, B. GIRONDELOT/ADEME

laboratoires de recherche publique et associe des partenaires industriels parmi les propriétaires de sites et les entreprises de la dépollution. Le GISFI a pour objectif d'augmenter les connaissances scientifiques sur les sites et sols pollués et développer les écotecnologies pour le traitement. Il aborde la question des friches industrielles en termes de ressources à restaurer et à valoriser. Le GISFI est notamment partenaire des projets LORVER et BIOXYVAL.

Un autre groupement est la fondation InnoVaSol créée en 2010 pour cinq ans. Elle réunit à l'université Michel-de-Montaigne Bordeaux 3, le conseil régional d'Aquitaine et quatre industriels : Total, SNCF, EDF et GDF Suez. Ces industriels, tous maîtres d'ouvrage sur des chantiers de dépollution, se sont regroupés au sein de la fondation pour mener des recherches et développer des innovations technologiques correspondant à leurs besoins. La fondation est soutenue financièrement par l'ADEME. Autre groupement d'industriels, onze au total aux côtés de l'ADEME et du ministère de l'Écologie, le réseau RECORD. Fondé en 1989, il n'effectue pas de recherches en propre. Il se charge de confier, notamment à ceux cités ici, des travaux de recherche sur des thèmes environnementaux, dont les sols pollués, définis par les membres.

Enfin, à côté de ces instituts, de nombreux acteurs privés ou publics s'intéressent aux divers aspects de la gestion des sites pollués. Parmi eux, on peut mentionner des sociétés d'ingénierie et de travaux telles que BURGEAP, ICF Environnement, SERPOL, ENOVO et des laboratoires académiques tels que l'Insa de Lyon, le LGCE (Laboratoire génie civil et géo-environnement) de Lille Douai Artois et le laboratoire Chrono-environnement de l'université de Franche-Comté. ■■

# Des défis tous azimuts

De l'étude des effets sur la santé jusqu'aux techniques de dépollution, le traitement des sols pollués mobilise une grande variété de connaissances scientifiques.

**Vaste programme !** S'agissant de la problématique des sols et des sites pollués, la décontamination proprement dite n'est que la partie émergée d'un immense iceberg. Au-delà de cette phase, déjà riche en défis pour la recherche, les questions soulevées par le sujet mobilisent en effet une immense variété de connaissances scientifiques pour mieux comprendre les phénomènes en jeu et mettre au point les technologies nécessaires.

Première série de verrous à lever : le diagnostic des sites au sens large. À savoir, à la fois la caractérisation des polluants présents en un lieu, la connaissance de leur comportement et celle de leur impact sur la santé. Concernant ce dernier point, de nombreux laboratoires, ceux de l'INERIS ainsi que le GISFI, en particulier, ont entrepris des travaux pour mieux évaluer l'effet des divers polluants sur la santé de l'homme et de l'écosystème. C'est un domaine qui fait l'objet de très nombreuses publications.

Par exemple, dans le cadre des évaluations quantitatives des risques sanitaires, l'une des voies d'exposition étudiée est l'ingestion de sol. Or seule une fraction de la quantité ingérée atteint réellement la circulation sanguine (biodisponibilité). Des travaux de recherche coordonnés par l'association RE-CORD, et effectués par les bureaux d'études ICF Environne-

ment et IPL Sede, se sont attachés à étudier le facteur correctif à mettre en œuvre dans le calcul de la dose d'exposition. Objectif : approcher la valeur de biodisponibilité par des tests *in vitro* de bioaccessibilité, moins coûteux à mettre en place que les actuels tests *in vivo*.

Ces recherches sont complétées par celles qui visent à connaître plus précisément le comportement des polluants. Comment se transforment-ils dans le sol ? Comment circulent-ils, c'est-à-dire comment se diffusent-ils dans l'air, l'eau, les interstices du sol, puis dans les plantes et les animaux pour parvenir au bout du compte dans les organismes humains ?

Des compétences très variées sont mobilisées pour acquérir des connaissances nouvelles sur ces sujets : comprendre, par exemple, le fonctionnement du « système sol », connaître précisément la proportion de contaminant assimilable par le corps humain et les organismes vivants, ce qui conduit la recherche à mettre au point des bio-indicateurs. Autant de défis majeurs pour les scientifiques. Ils ne sont pas à court d'idées. Ainsi, pour caractériser et évaluer les risques présents sur un site, c'est toute une palette d'organismes vivants qui sont mis à contribution – plantes, escargots (voir page 11), lombrics, acariens, micromammifères et jusqu'aux bactéries – cela dans le cadre du programme de recherche Bioindicateurs de l'ADEME, notamment.

Concernant la détermination des polluants effectivement présents dans le sol ou dans les eaux souterraines, de nombreux dispositifs existent déjà, que ce soit pour localiser et quantifier les zones sources ou trier les terres excavées. Par exemple, le GISFI dispose d'une station lysimétrique dédiée aux sites et sols pollués, qui permet d'étudier le devenir des polluants dans les sols dans les conditions réelles et de tester des solutions de traitement. Les sites complexes (polluants multiples, investigation en profondeur, profil géologique hétérogène, zones de remblais, canalisations multiples...) posent problème. Mais l'enjeu, au-delà de la mise au point de nouveaux types de mesures, est plutôt d'améliorer les dispositifs existants, c'est-à-dire essentiellement de réduire leur coût et de rendre leur uti-



## LIXIVIATION ET TRAITEMENT PAR IMMOBILISATION

La recherche menée par la fondation InnovaSol a pour objet d'établir une méthodologie fiable permettant d'estimer un taux maximal de lixiviation (extraction de produits solubles par un solvant, et notamment par l'eau circulant dans le sol) d'un sol pollué, si celui-ci reste en place. Cette approche sera utilisée sur des sols contaminés en métaux et en HAP (hydrocarbures aromatiques polycy-

cliques). L'immobilisation est conçue comme une technique applicable aux concentrations élevées et complémentaire à la phytoremédiation. Pour y parvenir, les chercheurs s'appliquent à mettre au point une méthodologie fiable de prélèvement de la solution de sol, à estimer le taux maximal de lixiviation sur une friche industrielle et à réaliser l'immobilisation sur colonne afin de tester les meilleurs produits.



© GISFI

Station lysimétrique du GISFI à Homécourt (Meurthe-et-Moselle).

## BIODISPONIBILITÉ ORALE

Depuis 2013, Total a engagé une collaboration avec l'École polytechnique de Montréal, visant à mettre en œuvre des programmes de recherche sur la bioaccessibilité et la biodisponibilité des polluants minéraux et organiques. Un des aspects de cette collaboration porte sur la prise en compte de la bioaccessibilité des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) présents dans les sols pollués. L'éva-

luation des risques sanitaires consiste en trois phases : l'estimation des concentrations des polluants dans les milieux d'exposition, l'évaluation de l'exposition et l'estimation des risques sur les personnes. Objectif : le développement d'un protocole *in vitro* permettant d'évaluer la biodisponibilité orale des HAP et l'intégration de cette donnée dans les évaluations des risques sanitaires.



© INERIS/VNF

Phytostabilisation aidée sur une parcelle de 1 ha.

lisation plus rapide et plus aisée (voir, pages 11 et 12 : le capteur d'InnovaSol et l'appareil laser portatif de détection des métaux d'IVEA). Cela dit, la recherche ne se prive pas d'inventer également des modes de détection nouveaux et tout à fait inattendus tels que... les arbres !

### DIAGNOSTIC, AVEC LES ARBRES POUR TÉMOINS

Ainsi, pas moins de 51 scientifiques de 7 pays ont participé au programme PIT, Pollution Investigation by Trees. Piloté par le laboratoire Chrono-environnement (UFC CNRS) et financé par l'ADEME, ce programme très original utilise les arbres comme témoins de la contamination des sols. On peut ainsi remonter dans le temps et dater la contamination, et même aller jusqu'à déterminer qui est responsable. La technique permet aussi de faire de multiples et rapides prélèvements sur les arbres en ville (allées, jardins, parcs...) et de déterminer les zones contaminées.

Dans la copieuse étude (170 pages), réalisée en mai dernier, à l'issue de ce programme de trois ans, Chris Balouet (Environnement International), et Michel Chalot (laboratoire Chrono-environnement) indiquent que les recherches ont eu

## TERRES EXCAVÉES

Soutenu par l'ADEME, le projet VALTEX a pour objectif l'émergence de filières de valorisation des terres excavées issues de sites pollués. Cette recherche, lancée en mars 2013 pour quatre ans, s'attache à démontrer la pertinence technico-économique du traitement et de la valorisation des terres excavées via les filières de travaux

publics routiers, de travaux d'aménagement et de production de granulats pour la fabrication de béton. Elle s'intéresse également à l'acceptabilité sociale et sociétale de la valorisation « hors site » des terres excavées. De quoi permettre l'émergence d'une offre globale innovante sur le marché français de la gestion des sites et sols pollués.

## TRAITEMENT ET RESTAURATION DES SITES CONTAMINÉS COMPLEXES

Ce projet soutenu dans le cadre du Programme des Investissements d'avenir et porté par le cluster lorrain ELFI (Écopole Lorraine friches industrielles) est destiné à tester en vraie grandeur une gamme de solutions de diagnostic et de traitement des sols en vue d'élaborer une filière de gestion intégrée des sites industriels marqués par des pollutions complexes. Le projet est porté par EODD (pour « je marche [eo, en latin]

vers le Développement Durable ») et il associe cinq autres entreprises, le BRGM et le GISFI. Il prend appui sur le site atelier du réseau SAFIR de Moyeuve-Grande en activité jusque dans les années 1970 (propriétaire Arcelor-Mittal). Parmi les solutions testées, on peut citer : le diagnostic géophysique, la modélisation, l'oxydation chimique *ex situ* et *in situ*, la refunctionalisation des sols et la phytoremédiation.

lieu sur 24 sites de démonstration et se sont intéressées aux solvants chlorés, hydrocarbures, HAP, PCB et métaux.

### DES SITES ATELIERS POUR EXPÉRIMENTER

Sur tous ces sujets, il faut noter l'apport des « sites ateliers » dans le cadre du réseau SAFIR de l'ADEME. SAFIR est destiné à mettre à disposition des chercheurs des sites réels sur lesquels des recherches peuvent être conduites en partenariat et en pluridisciplinarité. Ce sont des sites plus ou moins étendus présentant un problème réel de pollution. Ils sont mis à disposition d'équipes de recherche, de bureaux d'études ou de sociétés de service, notamment par des propriétaires en recherche de solutions de traitement ou de gestion de cette

pollution. Parmi eux, le site du GISFI à Homécourt (Meurthe-et-Moselle), créé sur une ancienne cokerie, qui comporte une station expérimentale d'une surface de 5 hectares.

Une fois les polluants identifiés et leur teneur dans les sols et les eaux souterraines quantifiées, la phase de réhabilitation peut alors commencer. Ici, coexistent trois grands modes opératoires. D'abord le traitement « hors site », dans une installation dédiée située à l'extérieur du site et où sont transportées les terres après excavation. Cette solution est très peu adaptée au traitement des eaux souterraines, hormis dans le cas de l'écumage d'une couche d'hydrocarbures flottants. Puis, le traitement « sur site », identique au premier, mais la dépollution se fait sur place. Enfin, le traitement *in situ*, qui est appliqué sur les sols ou les eaux en place. Ni excavation ni pompage, donc. Encore minoritaire, il présente toutefois l'avantage d'éviter de gros déplacements de matières dont il faut gérer la destination finale. La difficulté du traitement *in situ* est de s'assurer que la décontamination est complète, ce qui n'est pas chose facile compte tenu de l'hétérogénéité spatiale du sol, du sous-sol et de l'aquifère. En cas d'excavation, ce suivi est grandement facilité grâce au mélange intime entre des matériaux pollués avec les produits ou les phases utilisées pour le traitement.

Il existe une vaste panoplie de moyens de dépollution du sol. Les traitements physiques utilisent des fluides (eau, gaz) pour transporter la pollution vers des points d'extraction ou pour l'immobiliser. Les traitements chimiques font, eux, appel à des réactifs pour détruire les polluants ou les transformer en des composés moins toxiques. Les traitements thermiques, enfin, utilisent la chaleur pour détruire le polluant, l'isoler, le rendre inerte ou au contraire plus mobile, afin de favoriser son extraction. En cas d'excavation, le principal enjeu de la recherche porte sur la mise au point de solutions de gestion et de valorisation des matériaux excavés ainsi que des sous-produits résultant de la dépollution. Des avancées sont aussi à souligner pour le traitement *in situ* par des voies chimiques, notamment l'oxydation chimique (procédé Oxysol, financement Agence nationale de la recherche [ANR]). Dans ce cas, une attention particulière est portée sur les fonctions du sol, qui font l'objet de restauration après traitement, selon des procédés développés

Essais de phytostabilisation d'une lagune de stockage de déchets industriels avec production de biomasse.



Avant plantation :  
octobre 2010.



Après plantation :  
avril 2013.



© GISFI

Colonnes lysimétriques du GISFI (54)

notamment dans le cadre du projet Biotechnosol (GISFI, financé par l'ADEME).

Beaucoup de recherches sont conduites pour développer de nouvelles solutions de traitement *in situ* qui préservent la structure et la qualité chimique des sols. Parmi les voies de recherche, la thermodésorption, l'oxydation et la réduction chimique (qui peuvent faire appel à des nanocomposés pour augmenter la réactivité ou à des phases autres que l'eau comme vecteur de ces réactifs), ainsi que le lavage avec des surfactants (inspiré de l'industrie pétrolière).

Le traitement *in situ* est aussi l'affaire de la biologie. Bactéries, champignons et plantes sont ainsi appelés à la rescousse, mais ils ne sont malheureusement pas adaptés à tous les types de contaminants. Les phytotechnologies, l'utilisation des plantes, font l'objet d'un très grand nombre de travaux. Elles présentent de nombreux atouts : une certaine facilité de mise en œuvre, un coût financier raisonnable et une intégration facile dans un programme paysager. Ce sont des technologies qui reposent sur des principes très variés, parfois radicalement opposés : il peut s'agir d'extraire les polluants grâce à des plantes (phytoextraction et phytodégradation) ou, au contraire, d'accroître leur fixation dans le sol (phytostabilisation) pour bloquer les transferts. Dans ce domaine, l'INERIS et l'UFC mènent plusieurs projets d'évaluation des performances de ces solutions en grandeur réelle (cultures sur plusieurs hectares et sur de longues durées), tout en examinant les risques associés à la valorisation de la biomasse produite, dans le cadre de projets de recherche européens et nationaux, et notamment au travers des projets ANR franco-canadien BIOFILTREE (voir photos page 8) et ANR PHYTOCHEM coordonnés par l'UFC. Dernière façon de procéder : compter sur l'atténuation naturelle, à condition d'y affecter le monitoring nécessaire permettant de s'assurer du respect des objectifs fixés dans le cadre du plan de gestion et quitte à l'accélérer quelque peu grâce au couplage avec la phytoremédiation, comme le fait le BRGM ou le GISFI (projet Multipolsite) ou l'université de Lorraine.

## ÉVOLUTION DES CONTAMINANTS

À ce propos, déterminer les phases clés à valider, afin de qualifier et quantifier les phénomènes naturels régissant le comportement des polluants sur les sites pour utiliser l'atténuation

## CHASSE AUX PRODUITS CHLORÉS

Les solvants chlorés, qui font partie de la famille des composés organiques volatils (COV), sont parmi les plus répandus dans les sols et les eaux souterraines. Ce qui pose un problème sanitaire.

Du fait de leur vaste utilisation en tant que produits de nettoyage à sec ou agents dégraissants, ils font l'objet de nombreuses recherches, que ce soit au niveau de la pollution de l'air ou des eaux.

### DANS L'AIR

Les vapeurs toxiques des solvants chlorés sont susceptibles de migrer du sol vers l'air atmosphérique et l'air intérieur des bâtiments. Le projet FLUXOBAT, cofinancé par l'ANR, associant huit partenaires et coordonné par BURGEAP, a travaillé sur cette problématique. Il a permis de lever des verrous scientifiques (rôles respectifs de la convection, diffusion, effet d'échelle, etc.) et techniques (prise en compte des hétérogénéités du milieu et du polluant, variations temporelles des mesures, couplage des transferts sol/béton/bâtiment, etc.) liés à cette pollution. Il en est issu un guide méthodologique pour l'évaluation des transferts de COV. Il permet de déterminer les actions à entreprendre pour s'assurer de l'absence de pollution potentielle par des COV, pour s'assurer que l'état d'un site pollué reste compatible avec son usage actuel, pour réaménager un site pollué et

vérifier que l'évolution des pollutions résiduelles du site ne rende pas son état incompatible avec son usage.

### DANS L'EAU

Financé par l'ADEME et porté par Solvay, le projet SILPHES, démarré en 2013 pour trois à cinq ans, vise à associer, sur une pollution historique d'un site industriel, des outils de caractérisation et des techniques complémentaires de dépollution des eaux souterraines contaminées par des produits organochlorés. La recherche développera et validera des techniques de caractérisation des pollutions. Le but est de mettre au point des solutions de dépollution *in situ* robustes et peu coûteuses, applicables à une multiplicité de contaminants chlorés et, en outre, de développer un outil d'aide à la décision. À noter aussi, le projet CityChlor, coordonné par l'INERIS et l'ADEME, recherche aujourd'hui achevée et qui a permis de développer une approche intégrée de la gestion de sites pollués par ces solvants. Il a notamment démontré l'intérêt d'utiliser des techniques d'échantillonnage passif comme technique de prélèvement des eaux souterraines.

## RISQUES ET COMPOSÉS ORGANIQUES PERSISTANTS

Mené dans le cadre de GESIPOL par l'INERIS, le projet TROPHé, cible les composés organiques persistants de type dioxine ou furane (PCB, PCDD/F et PCB-DL). Il vise d'une part à améliorer la connaissance de leurs transferts, de leur bioaccumulation et de leur biodisponibilité dans la chaîne alimentaire et le réseau trophique, pour une meilleure prise en compte de ces mécanismes dans l'évaluation des risques sanitaires (ERS) et celle des risques environnementaux (ERE). D'autre part, il évaluera les expositions et

les risques à l'aide d'outils de modélisation MODULERS développés par l'INERIS (pour les ERS) et TerraSys de Sanexen (pour les ERE). Enfin, TROPHé s'attachera à identifier des étapes et des outils communs susceptibles d'être mis en œuvre dans les démarches d'ERS et d'ERE. Le projet combinera les deux démarches sur le site atelier de Saint-Cyprien en collaboration avec les équipes de recherche d'ores et déjà présentes sur le site, les équipes d'ANaPoP de l'UR AFPA de l'INRA et de l'UMR Chrono-environnement.

naturelle contrôlée dans le contexte réglementaire français, constituait les objectifs du projet ATTENA, cofinancé par l'ADEME, et du projet Multipolsite soutenu par l'ANR. Dans un premier temps, ont été précisées les conditions nécessaires à l'occurrence des processus d'atténuation naturelle, et une ébauche de protocole a été définie. Ensuite, ce protocole a été mis en œuvre sur trois sites de démonstration correspondant à trois familles de polluants organiques. Durant cette étape, ont été validées les utilisations des outils de caractérisation applicables aux démonstrations d'atténuation naturelle et, plus largement, à la gestion des sites pollués. Au final, le protocole ATTENA se présente comme un outil favorisant la nécessaire concertation entre les différentes parties prenantes (administrations, donneur d'ordre, consultant...) pour construire une proposition dans le cadre du plan de gestion présenté à l'administration. Les participants au programme sont le BRGM, l'INERIS, BURGEAP, l'APESA ainsi que Rhodia, Total et ArcelorMittal.

De leur côté, les recherches liées à la phytoremédiation visent également à valoriser le plus possible les plantes utilisées : extraction de métaux ou production de biomasse (LORVER) pour l'énergie ou le bâtiment.

## VALORISATION, DU NEUF AVEC DU VIEUX

LORVER est un projet destiné à créer en Lorraine une filière de biomasse végétale non alimentaire par la valorisation de sites dégradés et de sous-produits industriels. Initié par le GISFI, il s'agit d'un consortium de quatre entreprises et de cinq laboratoires. Premier aspect de LORVER : la reconstruction du sol par



*Déchets de combustion d'une ancienne centrale thermique à Calan (Roumanie).*

© BRGM / VALÉRIE GUÉRIN ET DANIEL HUBÉ

la valorisation de matériaux délaissés. Second aspect, la culture sur ces sites de biomasse adaptée. Quatre voies de valorisation pour les végétaux sont développées : production d'énergie (par pyrolyse), de charbon (biochar), élaboration de matériaux fibrés (chanvre et lin) et extraction de métaux (agromine). Quatre espèces végétales sont étudiées : peuplier, chanvre, orties et des plantes hyperaccumulatrices de métaux. Le consortium est coordonné par Valterra Dépollution Réhabilitation et par le Laboratoire LRGP (Laboratoire réactions et génie des procédés) du CNRS pour la partie scientifique.

La recherche scientifique est donc très active sur toutes les facettes de la dépollution. Néanmoins, il faut tenir compte d'autres obstacles non technologiques qui freinent son développement. Pêle-mêle : le manque d'incitation à valoriser les terres excavées (à ce propos, on consultera par exemple avec profit le guide de réutilisation des terres excavées du BRGM et le projet VALTEX), l'absence de systèmes d'information transparents sur les sites pollués et sur la performance des techniques de dépollution, la réglementation (notamment une législation non uniforme pour tous les types de sites), l'harmonisation européenne des règles de gestion et l'acceptabilité sociétale qui exige de nouvelles pratiques d'information et de concertation de la population. ■

OUTILS BIOLOGIQUES

# L'escargot indique la biodisponibilité du sol



© A. BISPO/ADEME

Dans le cadre du programme **ADEME-Bio-indicateurs 2**, le laboratoire Chrono-environnement de l'université de Franche-Comté a mis au point un indicateur permettant de déterminer le passage vers les organismes vivants (biodisponibilité) des métaux sur un site. Le dispositif utilise à cette fin : des escargots petits-gris – dont l'âge et le passé biologique

sont connus. Cette espèce offre une très grande capacité d'absorption de contaminants métalliques comme l'arsenic, le cadmium, le plomb, le zinc. Placés par groupe de 15 sur une zone du terrain à étudier, ces organismes les absorbent aussi bien en se déplaçant sur le sol, qu'en se nourrissant, ainsi que par voie aérienne. L'analyse de leurs tissus permet alors

de quantifier la présence de 14 métaux et métalloïdes donnant un indicateur – SET pour somme des excès de transfert – correspondant à la zone étudiée. Cette méthode testée sur pas moins de 13 sites a déjà été appliquée sur une zone polluée à Saint-Laurent-le-Minier (Gard), site à responsable défaillant géré par l'ADEME. Dans ce cas, elle a mis en évidence que ce ne sont pas les zones présentant les plus fortes concentrations en métaux dans les sols qui occasionnent les plus forts transferts. Elle a aussi mis en évidence, et de façon inattendue, un très fort transfert de thallium sur certaines zones du site en question. «L'indice obtenu par l'analyse des escargots constitue un outil d'aide à la décision en fournissant des informations quantifiées permettant de définir quelles sont les zones à gérer en priorité», souligne Annette de Vaulleury, responsable de ce projet. Prochaine étape : utiliser les escargots pour mesurer la biodisponibilité des polluants organiques.

MESURE

# Les métaux lourds détectés sur site

L'appareil portable **EasyLIBS** de la start-up française IVEA offre un service original : il permet de détecter très rapidement sur site la présence de métaux lourds dans un sol pollué. La cartographie de la contamination par les métaux lourds est obtenue directement à partir des mesures. La quantification précise des résultats acquis est actuellement effectuée en temps différé, un bref passage par un laboratoire étant encore nécessaire pour réaliser un étalonnage. L'analyseur d'IVEA, réalisé sous licence du CEA et d'AREVA NC, intègre et valorise de nombreux résultats de recherche. La LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) est une technique d'analyse chimique élémentaire qualitative et quantitative ; basée sur la spectrométrie d'émission optique de

plasma induit par laser, elle permet de détecter tous les atomes présents dans le matériau analysé. Le laser, réalisé par IVEA, est issu de travaux de l'université de Dijon. C'est enfin un programme de recherche soutenu par l'ADEME, CALIPSO, qui a permis de doter l'EasyLIBS de toutes les fonctionnalités propres à réaliser l'analyse sur le terrain des sols pollués par les métaux. Ce programme qui réunissait le BRGM et le laboratoire LOMA (université de Bordeaux) autour d'IVEA, a permis de «durcir» l'appareil. Il a également permis de réaliser la mise au point des logiciels de traitement appropriés et, enfin, de définir précisément les protocoles à mettre en œuvre pour effectuer les mesures sur site. Pour le moment, les récents développements de la LIBS fournissent des



© IVEA

résultats satisfaisants pour le plomb et relativement prometteurs pour l'aluminium, le cuivre, le fer et le zinc. «Doté de tous ces outils, l'appareil est prêt à l'emploi. N'importe qui peut l'utiliser pour effectuer les mesures sur site», précise Dominique Gallou, président et fondateur de la start-up IVEA. L'appareil d'un poids de 7kg et d'une autonomie d'une journée est vendu, selon les modèles, entre 25 000 et 45 000 euros.

POLLUTION DES AQUIFÈRES

# Prélever à la bonne profondeur

**La méthode traditionnelle de mesure** de la pollution des nappes d'eau souterraines consiste à utiliser des piézomètres dits « crépînés ». Ils effectuent les prélèvements sur des hauteurs importantes, voire sur toute la hauteur de l'aquifère. Or les eaux sont très souvent stratifiées, notamment en ce qui concerne les concentrations en polluants. D'où l'importance de pouvoir réaliser des prélèvements d'eau à une profondeur donnée. Il existe des dispositifs capables de réaliser une telle mesure mais ils sont coûteux et, surtout, longs à mettre en œuvre. Avec eux, il n'est guère possible de réaliser plus d'une mesure par jour. Pour résoudre le problème, la fondation InnovaSol s'est attachée

à mettre au point un préleveur à faible coût et simple d'utilisation. Cet outil reprend le principe des préleveurs fixes mais en utilisant, à la place de bouchons, des joints en caoutchouc semi-durs qui viennent racler le long du piézomètre. En outre, afin de disposer d'un préleveur pouvant atteindre plus de 8 mètres de profondeur, ce dernier est conçu avec une pompe immergée (12V) placée entre les deux joints hauts et bas. Ce système breveté atteint les objectifs que s'était fixés InnovaSol : de faible coût, il permet en particulier d'effectuer dans la même



journée de nombreuses mesures aux profondeurs voulues. Dans un premier temps, il sera utilisé pour fournir des prestations aux membres fondateurs d'InnovaSol (voir page 5). Ensuite, « nous pourrions être amenés à offrir plus largement ces prestations – c'est-à-dire les mesures et les analyses qui les accompagnent – aux entreprises qui le souhaitent, sachant que la compétence en matière d'analyse est fondamentale pour obtenir des résultats pertinents », indique Olivier Atteia, directeur scientifique d'InnovaSol.

Le préleveur mis au point par la fondation InnovaSol.

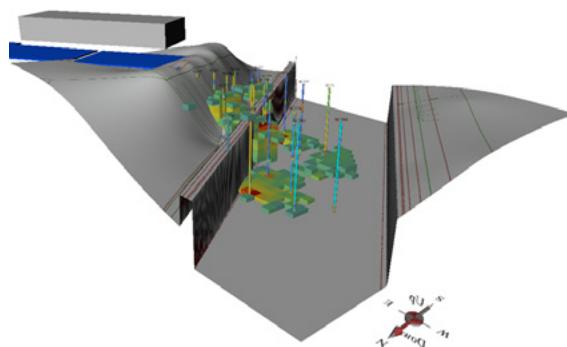
DIAGNOSTIC

# La géostatistique fait ses preuves

**La géostatistique consiste à interpoler** des phénomènes variant dans l'espace et le temps et à quantifier l'incertitude d'estimation associée. Développée initialement pour les besoins de l'industrie minière, elle a commencé à être mise en œuvre dans le cadre de l'étude des sols pollués, depuis une quinzaine d'années. Une étude récente, menée par Géovariances et eOde pour le réseau RECORD, lui donne une nouvelle jeunesse. Elle valide l'intérêt de cette méthode dans le cadre d'un diagnostic ou d'une réhabilitation de site pollué. Selon l'étude, la géostatistique fournit en effet « un cadre méthodologique rigoureux pour cartographier les contaminations en place, estimer les volumes et tonnages de matériaux contaminés et optimiser les stratégies

d'échantillonnage, notamment en phase de suivi de la dépollution ». En outre, la possibilité qu'elle offre de quantifier les incertitudes affectant les modèles de distribution spatiale de la pollution et de les transférer à des modèles de risques financiers ou sanitaires en fait « un intéressant outil d'aide à la décision ». L'étude s'efforce de proposer

plusieurs pistes d'amélioration pour développer son usage. Elle souligne notamment la nécessité d'analyser le rapport coût/bénéfice des études géostatistiques, tout en insistant sur le fait que « si une investigation détaillée et précise se traduit par un coût plus élevé, elle conduit surtout à d'importantes économies en phase de réhabilitation ».



Autour d'une ancienne installation nucléaire, la géostatistique a permis de replacer les données dans leur contexte d'origine et d'établir le modèle conceptuel de la contamination.

© GÉOVARIANCES

Dossier spécial publié dans *La Recherche* daté novembre 2014 - n°493 avec le soutien de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), de l'INERIS (Institut national de l'environnement industriel et des risques), du BRGM (Bureau de recherche géologiques et minières), de la Fondation InnovaSol, de RECORD (Réseau coopératif de recherche sur les déchets et l'environnement), du laboratoire Chrono-environnement et du GISFI (Groupement d'intérêt scientifique sur les friches industrielles) • Rédaction : Franck Barnu • Conception graphique et réalisation : A noir.

NE PEUT ÊTRE VENDU SÉPARÉMENT - LA RECHERCHE - Édité par la société Sophia Publications : 74, avenue du Maine, 75014 Paris. Tél. : 01 44 10 10 10