

Après la remédiation, le double enjeu de la restauration et de la requalification des sols

Par Corinne LEYVAL

Directrice de recherche, CNRS

Le fort développement industriel du début du XX^e siècle, puis son déclin à la fin du siècle dernier, ont fortement impacté des surfaces considérables de sol. Dans un contexte de raréfaction des sols et de pressions foncières croissantes, la remédiation et la réhabilitation de ces sols fortement anthropisés sont des enjeux forts. Au-delà de la nécessité d'éliminer la pollution présente et les risques associés pour l'environnement et la santé, la restauration et la requalification de ces friches et sols délaissés méritent d'être prises en considération. La possibilité de valoriser ces sols non seulement pour des usages comme la production de biomasse non alimentaire, mais aussi comme réserve de biodiversité est mise en avant dans cet article. Souvent perçues au départ comme un handicap, les friches industrielles peuvent ainsi devenir un véritable atout qu'il convient de valoriser.

Le sol, sur lequel nous vivons et qui nous nourrit depuis que l'homme existe, est de plus en plus impacté par les activités humaines, qui laissent une empreinte forte sur cette ressource fragile et non renouvelable. La révolution industrielle a été menée sans que quiconque se préoccupe de son impact sur l'environnement et la santé. L'ère post-industrielle s'est alors traduite par des diagnostics inquiétants en termes de contamination des sols. L'identification et la caractérisation de la pollution actuelle, et la recherche de méthodes de remédiation de celle-ci ont permis d'identifier des solutions techniques à cette pollution des sols. Mais à la nécessité d'y remédier s'est ajoutée celle de restaurer des sols vivants et qui fonctionnent, notamment en rétablissant leur capacité à fournir des services. Ainsi, on devrait pouvoir répondre aux Objectifs de développement durable définis par la Conférence des Nations Unies, notamment l'Objectif 15 : préserver et restaurer les écosystèmes terrestres en veillant à les exploiter de façon durable, enrayer et inverser le processus de dégradation des terres et mettre fin à l'appauvrissement de la biodiversité.

Conséquences des activités industrielles passées : un lourd héritage pour les sols

Le fort développement industriel du début du XX^e siècle, puis son déclin à la fin du siècle dernier ont fortement impacté des surfaces considérables de sol. Le site BASIAS (Base des anciens sites industriels et activités de

service), créé en 1994, recensait, en 2006, entre 300 et 400 000 sites sur le territoire français. Le nombre de sites identifiés dans la base Basol (base de données sur les sites et sols pollués) varie fortement d'un département à l'autre, pouvant même être supérieur à 400 dans certaines zones géographiques, notamment dans les départements de la Moselle et des Bouches-du-Rhône ou dans les Hauts-de-France et l'Île-de-France. On peut également citer le cas de sites sidérurgiques (Lamard et Vitoux, 2006), comme le site de Rombas (dans le bassin de Longwy), qui comprenait un ensemble complet d'activités allant de l'extraction du minerai de fer jusqu'à sa transformation en acier. Ce sont des activités industrielles qui mobilisent des surfaces de sols considérables pour y accueillir, outre la mine, des hauts fourneaux, des laminoirs, une usine à gaz et autres infrastructures associées, y compris des logements pour y héberger des milliers d'employés. Ainsi, on compte 6 000 hectares de friches industrielles en Lorraine, dont certaines se situent au cœur même des villes.

Ces surfaces considérables impactées par des activités industrielles qui perturbent le fonctionnement des sols, auxquelles s'ajoutent les espaces affectés par une artificialisation croissante liée au développement des villes (habitat, réseaux de transport), représentent une perte nette de ressource en sol pour l'agriculture ou pour les espaces naturels, et un facteur d'érosion de la biodiversité qu'ils hébergent. Ainsi, les sols artificialisés représentaient 9,3 % du territoire de la France métropolitaine en 2015. Dans un contexte de raréfaction des sols et de pressions

fongières allant croissantes, la remédiation et la réhabilitation de ces sols fortement anthropisés sont des enjeux forts.

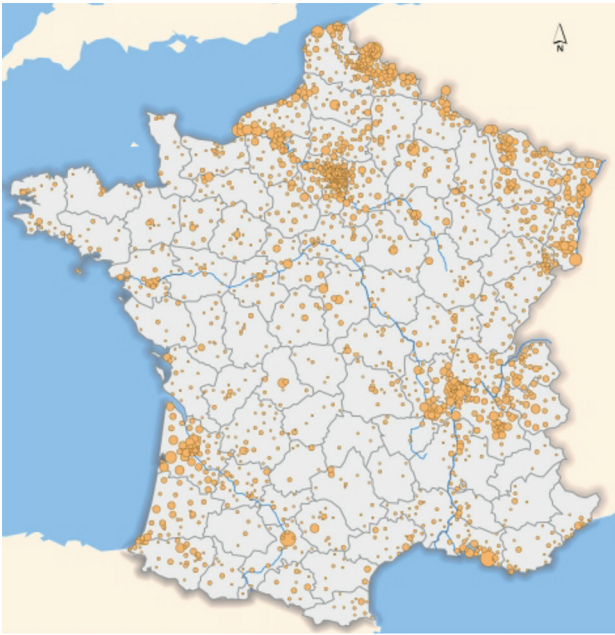


Figure 1 : Carte de France sur laquelle sont indiqués les sites faisant l'objet d'actions de surveillance ou de réhabilitation selon la base de données BASOL (Source : Meem/DGPR, Basol au 5 mars 2015).

L'arrêt de ces activités industrielles pose ainsi la question de la réhabilitation et de la requalification des espaces ainsi délaissés, souvent contaminés. La première étape est de réaliser un état des lieux, qui est parfois un exercice difficile lorsque les archives sont inexistantes ou ont disparu, et que les traces des différentes activités réalisées sur le site ont disparu après la fermeture de celui-ci. Il s'agit de procéder à une analyse de l'état des milieux (différentes sources de pollution, voies de transfert de celles-ci, enjeux à protéger) et à une étude détaillée des risques par la recherche et l'exploitation d'archives et la réalisation d'analyses complémentaires. En France, la politique de gestion des sites et sols pollués repose sur la gestion des risques sanitaires et environnementaux suivant l'usage qui est fait des milieux considérés. Ainsi, les objectifs de réhabilitation déterminés à partir des résultats d'une évaluation détaillée des risques le sont de façon à ce que le terrain, une fois traité, soit adapté à l'usage envisagé. On peut souligner l'absence d'objectifs de qualité des sols dans l'approche française, traduisant une volonté de ne pas établir de valeurs standards pour la qualité des sols. Ainsi, si aucun usage n'est envisagé, les friches peuvent rester en place et être délaissées.

Les friches industrielles, qui sont souvent perçues au départ comme un handicap, peuvent devenir un véritable atout qu'il convient de valoriser. C'est notamment le cas avec la création à Uckange (haut-fourneau U4) d'un centre économique, patrimonial et touristique, ou encore à Wesserling (Lamard et Vitous, 2006). Mais d'autres voies permettant de restaurer les propriétés physico-chimiques et biologiques de ces sols peuvent aussi être envisagées.

À l'Université de Lorraine, un certain nombre de laboratoires s'intéressent à cette problématique des sites et sols pollués, notamment au sein du pôle scientifique OTELO (Observatoire Terre et Environnement de Lorraine), qui regroupe des unités de recherche en géosciences. Le GISFI (Groupement d'intérêt sur les friches industrielles – gisfi.univ-lorraine.fr) a ainsi été créé il y a plus de quinze ans, il aborde des questions de recherche en lien avec le diagnostic, l'impact des pollutions, leur traitement, mais aussi la restauration et la requalification des sols impactés par les activités industrielles considérées.

Les méthodes de remédiation de la pollution des sols : de l'incinération à l'atténuation naturelle

Pour éliminer les polluants dans les sols, un certain nombre de techniques ont été développées et mises en œuvre. Elles sont basées sur des procédés physiques (lavage, tri granulométrique...), chimiques (oxydation ou réduction, désorption thermique...) ou biologiques (bioremédiation, phytoremédiation) et sont plus ou moins spécifiques des contaminants organiques ou métalliques (Ademe, 2009, Selecdepol (<http://www.selecdepol.fr>)).

Les techniques *in situ* sont moins coûteuses que les techniques hors site. Le surcoût des techniques hors site est lié au fait que la terre contaminée doit être excavée et transportée vers un centre de traitement, mais l'efficacité du traitement est mieux contrôlée. Ainsi, l'incinération ou la vitrification sont des traitements radicaux qui sont certes efficaces, mais aussi plus coûteux (par exemple, 400 à 900 \$/m³ pour la vitrification, selon Selecdepol), et qui, de plus, font perdre au sol toutes ses caractéristiques et ses fonctions. La désorption thermique, une des techniques utilisées pour réduire la concentration dans les sols de polluants organiques, tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) par volatilisation des polluants lors d'un chauffage à 400-600 °C du sol, conduit à une altération des sols, notamment de la matière organique présente et de l'activité biologique (O'Brien *et al.*, 2016).

L'atténuation naturelle n'est pas vraiment une technique de remédiation, mais elle peut faire l'objet d'un suivi au cours du temps (12 à 65 €/m², selon Selecdepol). C'est un ensemble de processus (sorption, dilution, biodégradation...) qui permet naturellement, sans intervention humaine, la réduction de la concentration des polluants. Cette technique peut être utilisée lorsque la contamination ne présente pas de risque avéré pour l'environnement et la santé humaine et peut être assistée par des plantes. L'atténuation naturelle peut ainsi être une solution intéressante dans des situations de pollutions anciennes, où la disponibilité des contaminants est très faible du fait de la forme chimique sous laquelle ils sont fixés, limitant la faisabilité de techniques telles que la bioremédiation. Après sept ans d'atténuation naturelle, la concentration des HAP dans un sol de friche industrielle de cokerie a ainsi été réduite de moitié (Leyval *et al.*, 2016). Dans ce cas, les propriétés des sols ne sont pas affectées et une recolonisation biologique (végétale, faune) spontanée est généralement observée.

Entre ces deux approches extrêmes de la gestion des sols pollués, lesquelles ont des impacts très différents sur les sols, les méthodes biologiques de remédiation (15 à 100 €/t, selon l'Ademe en 2010) sont largement utilisées, par exemple pour dégrader *in situ* certains polluants organiques comme les hydrocarbures. Elles sont souvent considérées comme moins coûteuses et surtout plus respectueuses de l'environnement que les techniques physico-chimiques ; un bémol toutefois, elles ne peuvent pas convenir à toutes les situations. Les techniques de phytoremédiation qui utilisent les plantes et les micro-organismes associés pour extraire (18 à 40 €/m², selon SelecDepol) ou stabiliser (2 à 12€/m²) la fraction mobile ou disponible des polluants métalliques ou encore transformer ou dégrader des polluants organiques, sont l'objet d'un grand intérêt depuis les années 1990. Elles ont été cependant assez peu utilisées jusqu'ici par les professionnels de la dépollution, car ce sont des techniques à action lente qui sont plus adaptées à de grandes surfaces, et qui, de fait, ne répondent pas à des objectifs de traitement accordant la primauté à la rapidité. *A fortiori*, leur application à des sites mal adaptés s'est traduite par des résultats peu satisfaisants. Toutefois, l'association de différentes techniques de traitement relevant de filières différentes, notamment la phytoremédiation combinée ou associée à un autre traitement (Cundy *et al.*, 2016), peut permettre d'obtenir de meilleurs résultats, tout en contribuant à restaurer les propriétés des sols. Ainsi, l'utilisation de plantes pour extraire de sols contaminés des éléments traces métalliques (ETM) devient plus intéressante économiquement parlant, lorsque les métaux accumulés dans la plante peuvent être extraits en vue de leur commercialisation sous la forme de molécules de haut intérêt. On parle ainsi de *phytomining* et même d'*agromining* pour l'utilisation de ces plantes sur des

sols pollués pour en récupérer les métaux à partir de leur biomasse (Van Der Ent *et al.*, 2015).

La refunctionalisation et la requalification des sols : un enjeu fort

Si la remédiation a pour objectif de réduire voire d'éliminer la concentration en polluants dans les sols, ou tout du moins de réduire leur disponibilité et les risques associés, le sol ainsi traité n'est pas pour autant sorti d'affaire, *a fortiori*, il est rare qu'il revienne à son état initial. Bien qu'il n'existe pas en France de valeurs standards de la qualité des sols, la notion de qualité des sols après traitement et celle de leur fonctionnement pour permettre une requalification suscitent de plus en plus d'intérêt. Ainsi, il a été démontré que si les traitements thermiques de remédiation sont très efficaces et rapides pour réduire la contamination en polluants organiques, ils altèrent fortement les propriétés des sols, notamment la matière organique du sol, sa texture, sa minéralogie et son pH (O'Brien *et al.*, 2016), et réduisent leur capacité à être des supports de végétation. Une refunctionalisation de ces sols qui ont fait l'objet de traitements de remédiation peut néanmoins être envisagée, et l'utilisation de plantes peut y contribuer. En revanche, le suivi sur le long terme de sols contaminés objet d'un traitement par atténuation naturelle ou ayant bénéficié d'un traitement par désorption thermique montre qu'après quelques années, la biodiversité de ces sols peut être à un niveau proche de celui de sols non contaminés (Thion *et al.*, 2012). Souvent caractérisés par une faible fertilité, se traduisant notamment par une faible teneur en azote, ces sols décontaminés peuvent néanmoins être de véritables supports de végétation.



Figure 2 : Prairie dont le sol a été reconstitué à partir de terre traitée par désorption thermique et de boues de papeterie (Sere *et al.*, 2008) (Homécourt, photo@gisfi.univ-lorraine.fr).

La construction de sols (ou « technosols ») à partir de terres décontaminées ou de déchets non toxiques (Sere *et al.*, 2008) est une voie récemment explorée pour recréer des sols fonctionnels, valoriser des terres sans usage, recycler des déchets ou limiter l'usage de terres non contaminées ou fertiles pour les réserver à l'agriculture. Ainsi, après une dizaine d'années, une prairie dont le sol a été reconstitué à partir de terre anciennement contaminée traitée par désorption thermique, de boues de papeterie et de compost, ressemble en tout point à une prairie naturelle (voir Figure 2 de la page précédente).

Quel avenir pour les sols délaissés, notamment les friches industrielles ?

La valorisation des friches industrielles et plus généralement des sols délaissés fait l'objet depuis quelques années déjà de nombreux projets de recherche et développement. Ainsi le projet LORVER (www.lorver.org), soutenu par la région Grand-Est et l'Union européenne, propose-t-il de développer une filière de production de biomasse non alimentaire à partir de sites dégradés ou de sous-produits industriels. Il peut s'agir d'utiliser des terres délaissées, des sédiments fluviaux, des terres ayant fait l'objet d'un traitement de décontamination, de boues et déchets non toxiques, ou de sols construits à partir de terres ou matériaux contaminés, pour produire de la biomasse à des fins énergétiques, pour en extraire les fibres ou les métaux. L'analyse d'un certain nombre de sols délaissés, correspondant par exemple aux sites d'anciennes cokeries, ou de sols construits à partir de terres décontaminées montre que ces sols présentent souvent une forte biodiversité (plantes, micro-organismes, faune) et pourraient même représenter une réserve de biodiversité (Vincent *et al.*, 2018). Par ailleurs, des essais réalisés montrent l'existence d'une capacité de certaines de ces terres à produire de la biomasse. On peut ainsi envisager que ces friches apportent, à plus ou moins long terme, une véritable valeur ajoutée aussi bien environnementale que commerciale.

À l'ère de l'anthropocène, il nous faut non seulement promouvoir toutes les mesures qui visent à protéger les sols (prévention de futures pollutions), mais aussi développer ces approches qui visent à maintenir et à restaurer les propriétés et le fonctionnement des sols impactés par les activités anthropiques. Il faut développer des démarches intégrées et des filières respectueuses des propriétés des sols et de leur biodiversité. Une des questions essentielles sera aussi de faire évoluer la législation française, qui considère comme un déchet tout sol excavé, même s'il est décontaminé.

Bibliographie

ADEME (2009), « Traitabilité des sols pollués – Guide méthodologique pour la sélection des techniques et l'évaluation de leurs performances », Angers, 245 p.

CUNDY A. B., BARDOS R. P., PUSCHENREITER M., MENCH M., BERT V., FRIES-HANL W., MÜLLER I., LI X. N., WEYENS N., WITTERS N. & VANGRONSVELD J. (2016), "Brownfields to greenfields: Realising wider benefits from practical contaminant phytomanagement strategies", *Journal of Environmental Management* 184, pp. 67-77.

LAMARD P. & VITOUX M.-C. (2006), « Les friches industrielles, point d'ancrage de la modernité », *Histoire, Mémoire et Patrimoine*, Lavauzelle, 214 p.

LEYVAL C., CÉBRON A., BEGUIRISTAIN T., FAURE P. & OUVREARD S. (2016), "Pollution mitigation: natural attenuation of organic pollutants. In Soils within Cities - Global approaches to their sustainable management – Composition, properties, and functions of soils of the urban environment", Ed. LEVIN Maxine J., KIM Kye-Hoon John, MOREL Jean-Louis, BURGHARDT Wolfgang, CHARZYNSKI Przemyslaw & SHAW Richard K., IUSS Working Group SUITMA.

O'BRIEN P. L., DESUTTER T. M., CASEY F. X. M., KHAN E. & WICK A. F. (2016), "Thermal remediation alters soil properties a review", *Journal of Environmental Management* 206, pp. 826-835.

SERE G., SCHWARTZ C., OUVREARD S., SAUVAGE C., RENAT J.-C. & MOREL J.-L. (2008), "Soil construction: a step for ecological reclamation of derelict lands", *Journal of soils and sediments* 8, pp. 130-136.

THION C., CÉBRON A., BEGUIRISTAIN T. & LEYVAL C. (2012), "Long-term *in situ* dynamics of the fungal communities in a multi-contaminated soil are mainly driven by plants", *FEMS Microbial Ecology* 82, pp. 169-181.

VAN DER ENT A., BAKER A. J. M., REEVES R. D., CHANEY R. L., ANDERSON C. W. N., MEECH J. A., ERSKINE P. D., SIMONNOT M.-O., VAUGHAN J., MOREL J.-M., ECHEVARRIA G., FOGLIANI B., RONGLIANG Q. & MULLIGAN D. R. (2015), "Agromining: farming for metals in the future", *Environmental Science and Technology* 49, pp. 4773-4780.

VINCENT Q., AUCLERC A., BEGUIRISTAIN T. & LEYVAL C. (2018), "Assessment of derelict soil quality: abiotic, biotic and functional approaches", *Science of the Total Environment* 613, pp. 990-1002.