

GESTION DE LA POLLUTION (DÉPOLLUTION)



DESCRIPTION DE L'ÉTAPE « DÉPOLLUTION »

L'étude de différents scénarios de gestion d'une pollution est réalisée dans le cadre du plan de gestion (PG). Ce document définit plusieurs stratégies de réhabilitation à appliquer, adaptées aux spécificités de la pollution et du site (localisation, forme chimique et distribution des polluants, contraintes techniques et économiques). Ces scénarios de gestion peuvent intégrer plusieurs actions : dépollution, mesures constructives, restrictions d'usage milieux, ou encore adaptation du projet d'aménagement. Ils sont comparés dans un Bilan Coût-Avantage sur la base de différents critères (technique, sanitaire, environnemental, économique, socio-politique...).

Le Plan de Conception des Travaux (PCT) permet de valider techniquement le ou les scénarios retenus au plan de gestion pour traiter la ou les sources de pollution. Cette phase repose sur la mise en œuvre d'essais de faisabilité des techniques de dépollution envisagées (mesures en laboratoire, mesures sur le terrain, essais pilote...).

Ce chapitre présente différents outils permettant d'orienter le choix de la technique de dépollution lors de l'élaboration du plan de gestion ou du plan de conception des travaux, de gérer une pollution ou de suivre ces opérations de dépollution.

TECHNIQUES UTILISABLES ET RÉPONSES APPORTÉES LORS DE L'ÉTAPE « DÉPOLLUTION »

CERTAINES TECHNIQUES PERMETTENT DE COMPLÉTER LA CONNAISSANCE DU SITE ET DE LA POLLUTION EN VUE D'ORIENTER ET DE VALIDER LE CHOIX DE LA TECHNIQUE DE DÉPOLLUTION

Des techniques permettent de compléter le diagnostic du site et de la pollution. Elles sont présentées dans la fiche étape 1.

Les caractéristiques du sol et des polluants permettent-elles d'envisager le recours à des techniques biologiques ?

● Les **méthodes de biologie moléculaire** permettent d'identifier et quantifier la présence et l'activité de microorganismes impliqués dans des processus de biodégradation, sous réserve de connaître ces processus. Les investigations sont réalisées à partir d'échantillons de sol ou d'eau prélevés sur site sur lesquels sont réalisés l'extraction et l'analyse des composants moléculaires d'une cellule (ADN, ARN ou protéines). Les résultats interprétés donnent une information complémentaire aux analyses chimiques en permettant d'adapter la technique de dépollution au processus réel de biodégradation.

● Les **phytotechnologies** étudient la possibilité de phytomanagement par les plantes en place ou par des plantes d'apport. Le phytomanagement peut consister à stabiliser le sol pour éviter l'envol de poussières ou l'érosion hydrique (phytostabilisation), à extraire le polluant pour le détruire ou le réutiliser (phytoextraction et phytomining) ou à limiter le transfert des polluants vers les plantes pour produire de la biomasse à vocation non-alimentaire sur des sols pollués. Ces phytotechnologies sont basées sur la phytodisponibilité de la pollution c'est-à-dire le transfert effectif des polluants vers les végétaux. Les résultats d'analyses réalisées sur des feuilles prélevées sur site estiment l'accumulation des polluants dans les plantes. Ces techniques rapides, peu coûteuses et

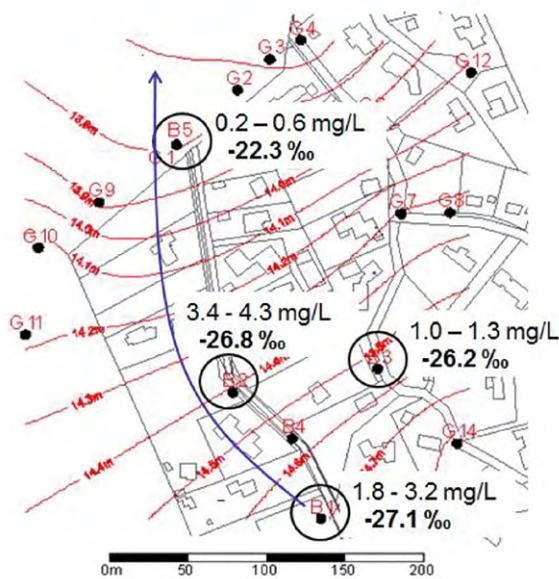
non-intrusives permettent d'évaluer l'efficacité *a priori* d'une technique par phytomanagement (par phytoextraction ou phytostabilisation).

● Les **essais d'extraction des gaz du sol** renseignent, grâce aux mesures physiques et chimiques effectuées sur site (T°C, O₂, CO₂, CH₄, H₂S, etc.), sur l'existence ou non d'une activité biologique associée aux pollutions organiques au sein de la zone non saturée. L'interprétation des résultats des essais de prélèvement de gaz du sol donne une information indirecte du potentiel de biodégradation des microorganismes (consommation d'oxygène, augmentation de la température).

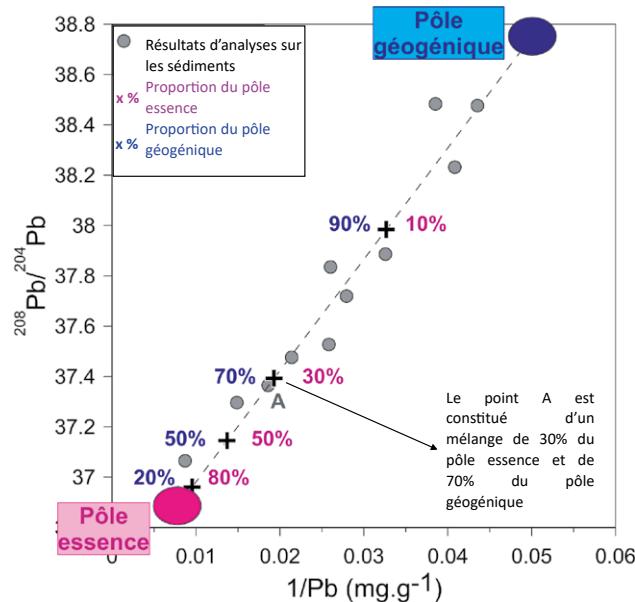
Les essais de faisabilité des techniques sélectionnées donnent-ils des résultats satisfaisants ?

● Les **techniques de biologie moléculaire** permettent de quantifier l'activité des microorganismes impliqués dans des processus de biodégradation, lors d'essais de faisabilité. Les investigations sont réalisées à partir d'échantillons de sol ou d'eau prélevés lors des essais sur site ou en laboratoire. Les composants moléculaires d'une cellule (ADN, ARN ou protéines) sont extraits et analysés. Les résultats interprétés donnent une information complémentaire aux analyses chimiques qui informent sur les concentrations en polluants et en métabolites. Ces méthodes permettent d'adapter la technique de dépollution au processus réel de biodégradation et de valider la faisabilité de la technique choisie.

● Les **outils isotopiques** déterminent les rapports entre différents isotopes des composés organiques ou des éléments traces métalliques. Ils étudient à travers un prélèvement d'eau ou de sol le phénomène de dégradation des polluants



© Blessing (2008) - ATTENA



© BRGM

Les outils isotopiques orientent les techniques de dépollution en informant sur le processus de dégradation du polluant : sur le site présenté, a) la diminution de la concentration en PCE dans le panache est accompagnée b) d'un enrichissement isotopique.

organiques. Ces outils interviennent en complément des analyses chimiques et donnent une information sur l'état de dégradation des polluants ce qui permet d'améliorer la connaissance sur le processus de dégradation et d'adapter voire valider la technique de dépollution. De plus, une approche multi-isotopique permet d'identifier la voie de biodégradation d'un composé organique.

- Les **biotests ou bioessais** sont des techniques de laboratoire standardisées exposant des organismes à des sols ou eaux prélevés sur site. Les résultats des essais quantifient les effets toxicologiques de la pollution sur ces organismes et permettent d'évaluer l'efficacité du traitement de manière complémentaire à des résultats d'analyses chimiques.
- Les **techniques de séparation chimique** caractérisent la spéciation chimique (état de valence et/ou complexation) des éléments traces métalliques qui peuvent présenter des formes différentes. Ces outils, complémentaires aux analyses chimiques classiques, donnent une information sur les concentrations des différentes formes chimiques des éléments ce qui permet d'évaluer si les éléments traces métalliques ont évolué vers des formes plus stables et/ou moins toxiques et d'adapter voire valider la technique de dépollution.
- Les **techniques de caractérisation minéralogique** sont des techniques d'imagerie ou d'analyse globale qui peuvent indiquer la répartition des éléments traces métalliques dans les minéraux présents. Leur utilisation sur des prélèvements de sol permet d'observer une modification de la répartition des éléments traces métalliques vers des formes plus stables ou la stabilisation ou l'élimination des minéraux réactifs et

ainsi d'évaluer l'efficacité des solutions de traitement mises en œuvre.

● Les **techniques d'analyse ou de mesure de terrain** comme la **pXRF** ou les essais d'extraction de gaz du sol, le **PID** ou la **MIP** permettent d'obtenir des informations sur la présence (résultats qualitatifs) et la quantité (résultats semi-quantitatifs à quantitatifs) de certains polluants et ainsi de suivre en temps réel l'évolution des essais pilotes. Les investigations peuvent être non intrusives ou être réalisées sur des prélèvements de sol, d'eau ou d'air à l'issue de la phase d'échantillonnage. Le recours à un laboratoire d'analyses pour analyses chimiques classiques accréditées permet de valider les résultats sur certains échantillons. La **pXRF** quantifie les polluants inorganiques à partir d'un prélèvement de sol. La **MIP** permet de caractériser en temps réel l'extension verticale et horizontale d'une pollution par des COV dans les sols et gaz du sol. Le **PID** détecte principalement les COV dans l'air ambiant ou les gaz du sol. Le **couplage des mesures de terrains avec des outils géostatistiques** permet l'obtention très rapide de cartographies ou d'estimation de quantités et apporte un indice de fiabilité important à ces résultats.

● Les **outils de caractérisation haute résolution de la nappe et les échantilleurs passifs** permettent de tirer le meilleur parti des forages existants en mesurant un paramètre physico-chimique ou en réalisant un prélèvement ponctuel sur une plage de profondeur donnée. Les informations fournies aident au choix des zones à traiter en priorité (localisation de la pollution, flux d'eau et perméabilité) et donc sur le type de traitement à réaliser et permet un suivi de l'essai de faisabilité précis verticalement.

DES TECHNIQUES INNOVANTES ET ÉPROUVÉES PERMETTENT LA GESTION D'UNE POLLUTION

Comment gérer la pollution ?

- Les **phytotechnologies** étudient la possibilité de phytomanagement par les plantes en place ou par des plantes d'apport. Le phytomanagement peut consister à stabiliser le sol pour éviter l'envol de poussières ou l'érosion hydrique (phytostabilisation), à extraire le polluant pour le détruire ou le réutiliser (phytoextraction et phytomining) ou à limiter le transfert des polluants vers les plantes pour produire de la biomasse à vocation non-alimentaire sur des sols pollués. Des essais pilotes de ces techniques peu coûteuses et non-intrusives sont nécessaires pour évaluer l'efficacité d'une réhabilitation par phytomanagement (par phytoextraction ou par phytostabilisation).
- Le **balayage par fluides non-newtoniens** est une technique de dépollution *in situ* qui concerne les eaux souterraines et les sols, en zone saturée ou non saturée. Cette technique vise à extraire les polluants organiques en phase liquide du sol de manière homogène en utilisant des fluides non-newtoniens rhéofluidifiants comme des mousses ou des gels pour lesquels la viscosité varie avec la lithologie. Ces fluides non-newtoniens ne sont pas toxiques pour l'être humain ni pour l'environnement dans les conditions dans lesquelles ils sont utilisés. Le mécanisme de dépollution est physique et consiste à accéder à toute la pollution, la désorber et à déplacer mécaniquement et de manière homogène le polluant pur et les eaux contaminées vers un point d'extraction.
- L'**electro-biorémédiation (EBR)** est une méthode de dépollution *in situ* des nappes phréatiques (zones sources ou panaches de pollution), combinant électrochimie et réaction de Fenton. Elle utilise des électrodes spéciales pour générer *in situ* des oxydants puissants (radicaux hydroxyles ·OH), capables de dégrader de nombreux polluants organiques jusqu'à leur minéralisation complète. Elle est utilisable uniquement en zone saturée, sans limite de profondeur.

Comment suivre la dépollution ?

- Certaines **méthodes géophysiques** permettent de suivre l'extension et les concentrations des polluants du panache de pollution à travers l'évolution de paramètres physiques. Ces techniques sont utilisables à condition d'avoir un contraste suffisant et de connaître les processus de dégradation impliqués et leur influence sur le milieu. Les investigations sont non-intrusives et il est possible de réaliser le suivi à distance. L'information fournie est continue spatialement et semi-quantitative. Elle est à coupler avec des analyses chimiques des eaux du panache qui donnent des informations ponctuelles et quantitatives.
- Les **méthodes de télédétection aéroportée** permettent de suivre la dépollution sur site en cartographiant précisément les zones excavées ou traitées et en quantifiant les volumes de terre déplacés. Le **LiDAR** détecte les variations topographiques liées aux terrassements ou aux travaux de confinement. La **photogrammétrie** aide à observer l'évolution du couvert végétal, révélateur d'une reprise de l'activité biologique ou de rémanence de pollution. Enfin, leur usage répété dans le temps offre un suivi visuel comparatif de l'évolution du site.
- Les **techniques de biologie moléculaire** permettent de suivre les processus de biodégradation en quantifiant l'activité des microorganismes impliqués, sous réserve de connaître ces processus. Les investigations sont réalisées à partir d'échantillons ponctuels de sol ou d'eau prélevés sur site sur lesquels sont réalisés l'extraction et l'analyse des composants moléculaires d'une cellule (ADN, ARN ou protéines). Les résultats interprétés donnent une information complémentaire aux analyses chimiques en permettant de suivre l'activité de biodégradation. Il est ainsi possible de connaître la surface impactée par la dépollution mais également de surveiller les métabolismes en place.
- Les **outils isotopiques** déterminent les rapports entre différents isotopes des composés organiques. Ils étudient à travers un prélèvement d'eau ou de sol le phénomène de dégradation des polluants organiques. De manière complémentaire aux analyses chimiques qui regardent l'évolution des teneurs et concentrations, ces outils donnent une information sur l'état de dégradation des polluants ce qui permet d'adapter voire valider la technique de dépollution.
- Les **biotests ou bioessais** sont des techniques de laboratoire standardisées exposant des organismes à des sols ou eaux prélevés sur site. Les résultats des essais quantifient les effets toxicologiques de la pollution sur ces organismes et permettent d'évaluer l'efficacité du traitement de manière complémentaire à des résultats d'analyses chimiques.
- Les **techniques de séparation chimique** caractérisent la spéciation chimique (état de valence et/ou complexation) des éléments traces métalliques qui peuvent présenter des formes différentes. À l'aide de mises en solution de fractions solides, les analyses sur des prélèvements de sol ou d'eau donnent une réponse quantitative complémentaire aux analyses chimiques classiques. Ces techniques informent de manière directe sur les concentrations des différentes formes chimiques des éléments et permettent d'évaluer s'ils ont évolué vers des formes plus stables (forme chimique) dans l'environnement.
- Les **extractions uniques et séquentielles** caractérisent la spéciation des éléments traces métalliques en regardant leur association avec les différentes phases porteuses du sol. À travers une ou plusieurs mises en solution de fractions solides spécifiques, ces techniques, complémentaires aux analyses chimiques classiques, permettent d'évaluer si les éléments traces métalliques ont évolué vers des formes plus stables (mobilité) dans l'environnement.
- Les **techniques de caractérisation minéralogique** sont des techniques d'imagerie ou d'analyse globale qui peuvent indiquer la répartition des éléments traces métalliques dans les minéraux présents. Leur utilisation permet d'observer une modification de la répartition des éléments traces métalliques vers des formes plus stables ou la stabilisation ou l'élimination des minéraux réactifs et ainsi d'évaluer l'efficacité des solutions mises en œuvre.
- Les **techniques d'analyse ou de mesure de terrain** permettent d'obtenir des informations sur l'évolution des teneurs ou concentrations en polluants (résultats semi-quantitatifs à quantitatifs) pendant la phase de terrain. Les investigations permettent d'affiner la précision de maillage pour le choix de



Matériel nécessaire au prélèvement, tamisage et mesure sur site avec la technique pXRF.

la filière d'élimination, d'optimiser le volume de déblais/terres à traiter en attendant les résultats d'analyses en laboratoire ou de contrôler les objectifs de réhabilitation à l'avancement pour limiter les coûts d'immobilisation du matériel de chantier. Parmi les techniques de terrain, la **pXRF** quantifie les polluants inorganiques à partir d'un prélèvement de sol et les **essais d'extraction des gaz du sol** permettent d'évaluer l'efficacité du traitement avec les mesures pré-traitement et post-traitement de paramètres physiques et chimiques (pollutions organiques volatiles et Hg°). La **MIP** permet de caractériser en temps réel l'extension verticale et horizontale d'une pollution par des COV dans les sols et gaz du sol. Le **PID** détecte principalement les COV dans l'air ambiant ou les gaz du sol. Le **couplage des mesures de terrains avec des outils géostatistiques** permet l'obtention très rapide de cartographies ou d'estimation de quantités et apporte un indice de fiabilité important à ces résultats.

- Les **outils géostatistiques** sont un outil d'interprétation rapide et poussé de l'ensemble des données disponibles obtenues par une ou plusieurs techniques, sous réserve qu'elles soient suffisamment nombreuses. Ils permettent de produire des cartes d'incertitudes sur la connaissance d'une pollution étudiée dans le sol ou dans la nappe et ainsi aider dans le

choix d'implantation de sondages ou piézomètres complémentaires. Les données d'entrées peuvent être ponctuelles (résultats d'analyses) ou bien tridimensionnelles (résultats d'investigations géophysiques).

- Les **outils de caractérisation haute résolution de la nappe et les échantilleurs passifs** permettent de tirer le meilleur parti des forages existants en réalisant un ou des prélèvements ponctuels sur une plage de profondeur donnée qui informe sur l'extension verticale du panache de pollution dans la nappe et permettent une meilleure caractérisation chimique verticale. La mesure ou le prélèvement sur une plage de profondeur donnée permet également une aide à l'injection de produit réactif ou permet de vérifier l'efficacité du traitement en 3D.
- Concernant les **pollutions aux microplastiques**, certaines **méthodes de caractérisation des microplastiques** comme la spectroscopie FTIR et la pyrolyse GC-MS permettent de quantifier et d'identifier la nature des microplastiques présents avant, pendant et après les opérations de dépollution et ainsi de mesurer l'efficacité des actions de dépollution menées.



Exemple d'échantilleurs intégratifs passifs de type A) POCIS, B) Chemcatcher®, C) DGT et D) SMPD avec leurs boîtiers et supports de fixation.