

DIAGNOSTIC



DESCRIPTION DE L'ÉTAPE « DIAGNOSTIC »

Le diagnostic informe sur l'état des milieux et sur les enjeux associés avec l'objectif de pouvoir définir une stratégie de gestion propre au site et aux milieux environnants. Le diagnostic repose sur une série d'investigations progressives et itératives qui sont plus ou moins poussées selon les objectifs de l'étude et du contexte environnemental (toxicité des polluants, vulnérabilité des milieux, cibles à protéger, contexte économique...). Il aboutit à la construction ou à la consolidation du schéma conceptuel du site au fur et à mesure de l'acquisition, de l'organisation et de l'interprétation des données spécifiques au site et représentatives du contexte local.

Le diagnostic apporte des éléments de compréhension du contexte environnemental (géologie, hydrogéologie...) et permet de caractériser les milieux étudiés (sols, eaux, air, denrées alimentaires...) qui peuvent constituer une source de pollution, être des milieux de transfert (selon le contexte environnemental) et/ou des milieux d'exposition (selon l'usage de ces milieux). **Une source de pollution est la zone du sol ou sous-sol**

qui renferme des substances polluantes qui sont émises vers des milieux de transfert et/ou d'exposition.

Une fois les milieux caractérisés, le diagnostic permet d'identifier certains impacts de la pollution au regard du référentiel retenu pour chaque milieu (valeurs réglementaires, environnement local témoin...) voire, de réaliser une première appréciation des risques pour la santé et l'environnement. **L'impact est la conséquence de l'émission de substances par une source de pollution dans les différents milieux que sont l'air, le sol, l'eau, ou les aliments.** Un impact est identifié lorsqu'il remet en cause l'usage d'un milieu ou qu'une dégradation de la qualité du milieu est constatée.

En cas de renaturation ou d'une gestion écologique d'un chantier, c'est l'état global du site qui est défini à partir d'indicateurs pour informer de la dégradation du milieu.

Ce chapitre présente différents outils qui permettent de préciser le contexte environnemental (géologie, hydrogéologie), de rechercher l'origine et les caractéristiques d'une source de pollution ou d'identifier les impacts d'une pollution sur les milieux.

TECHNIQUES UTILISABLES ET RÉPONSES APPORTÉES PAR L'ÉTAPE « DIAGNOSTIC »

LE DIAGNOSTIC PERMET DE PRÉCISER LE CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL

Quelle est la géologie et l'hydrogéologie locale ?

- Les **méthodes géophysiques** permettent de décrire le sol (géologie et hydrogéologie locale) à partir des variations de propriétés physiques entre les différentes couches, sous réserve d'avoir un contraste suffisant entre les couches géologiques. Les investigations sont non-intrusives et leur rendement est optimal sur de grandes surfaces. Dans ce contexte, ces méthodes géophysiques sont indirectes, elles caractérisent le milieu et pas la pollution.
- Les **méthodes de télédétection aéroportée** permettent d'obtenir des fonds de plan reconstituant précisément le relief et l'occupation en surface du site. Ces données peuvent être utilisées pour une étude hydrographique, pour identifier des zones d'érosion et des voies de transfert préférentielles de matériaux. Ces investigations sont non-intrusives et leur rendement est optimal sur des sites complexes de grandes surfaces. Ces méthodes indirectes caractérisent le milieu et pas la pollution.
- Les **techniques de caractérisation minéralogique** sont des techniques d'imagerie ou d'analyse globale qui déterminent la composition minéralogique d'un sol. Les résultats d'analyse sur les échantillons de sol donnent une information qualitative sur la nature des différents minéraux et/ou quantitative (proportion de chaque minéral).
- Les **outils géostatistiques** sont un moyen d'interprétation rapide et poussée 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 de la géologie et ainsi aider dans le choix d'implantation de sondages ou piézomètres complémentaires. Les données d'entrées peuvent être ponctuelles, ou bi (log géologique), voire tridimensionnelles (résultats d'investigations géophysiques).
- Les **outils de caractérisation haute résolution de la nappe** et les **échantilleurs passifs** permettent des mesures ou des analyses sur une plage de profondeur donnée pour une meilleure caractérisation hydrodynamique de la nappe. Ce type de technique met en évidence des flux hétérogènes sur la profondeur ou verticaux. Les investigations sont ponctuelles et intrusives et informer sur la présence d'horizons plus ou moins perméables ou productifs et sur la vulnérabilité de la nappe.

Quels sont les microorganismes présents ou actifs dans le sol et le sous-sol (biodiversité) ?

- Les **techniques de biologie moléculaire** permettent de connaître les populations de microorganismes présentes ou actives à partir de l'extraction et de l'analyse des composants moléculaires d'une cellule (ADN, ARN, protéines). Elles étudient des échantillons de sol, d'eau, d'air ou de déchets

prélevés sur site. Les résultats interprétés fournissent des informations sur la biodiversité en place à travers la diversité et l'abondance des microorganismes qui ne sont pas étudiés avec les techniques de microbiologie classique, car difficilement isolables pour être cultivés.

- Les **essais d'extraction des gaz du sol** renseignent, grâce aux mesures physiques et chimiques effectuées sur site ($T^{\circ}C$, O_2 , CO_2 , CH_4 , H_2S , 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 sur la présence et l'activité des microorganismes (consommation d'oxygène, augmentation de la température).

LE DIAGNOSTIC PERMET DE CARACTÉRISER LA POLLUTION

Quel est le type et l'état du polluant ?

- Les **techniques de biologie moléculaire** permettent de déterminer les processus de biodégradation de la pollution lorsqu'elles mettent en évidence une activité de biodégradation par des microorganismes spécifique. 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 fournissent des informations sur l'activité des microorganismes responsable de la biodégradation du polluant.
- Les **outils isotopiques** mettent en évidence ou estiment les phénomènes de dégradation des composés organiques. Ils déterminent à travers un prélèvement de sol, d'eau ou d'air les rapports entre les différents isotopes des polluants. Ils permettent également de distinguer différents phénomènes (dilution, volatilisation, dispersion, transformation abiotique ou biodégradation). Ces outils complètent les analyses chimiques classiques en donnant des informations supplémentaires sur le polluant et son état.

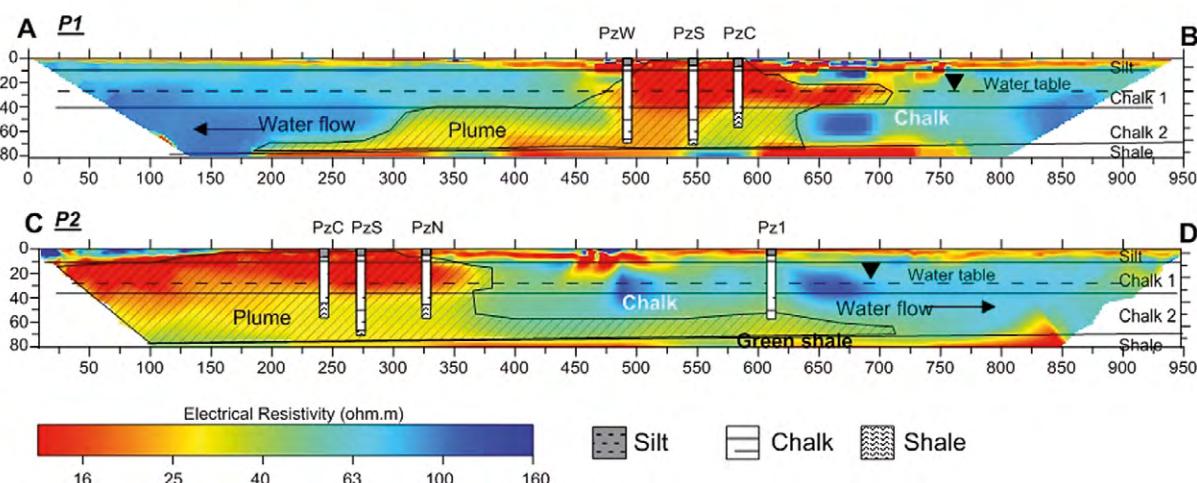
- Les **techniques de séparation chimique** caractérisent la spéciation chimique (état de valence et/ou complexation) des éléments traces métalliques qui peuvent présenter des formes différentes. Les résultats des analyses sur des prélèvements de sol ou d'eau donnent une réponse quantitative complémentaire aux analyses chimiques classiques. Ces techniques informent de manière directe sur les concentrations des différentes formes chimiques des éléments.

Les **techniques d'analyse ou de mesure de terrain**, comme la pXRF, ou les essais d'extraction de gaz du sol, permettent d'obtenir des informations sur la présence (résultats qualitatifs) et la quantité (résultats semi-quantitatifs à quantitatifs) de certains polluants pendant la phase de terrain. Certaines 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. D'autres sont intrusives et nécessitent l'insertion d'une sonde dans le sol à l'aide d'un système de forage direct. Le recours à un laboratoire d'analyses pour analyses chimiques classiques accréditées permet de valider les résultats sur certains échantillons.

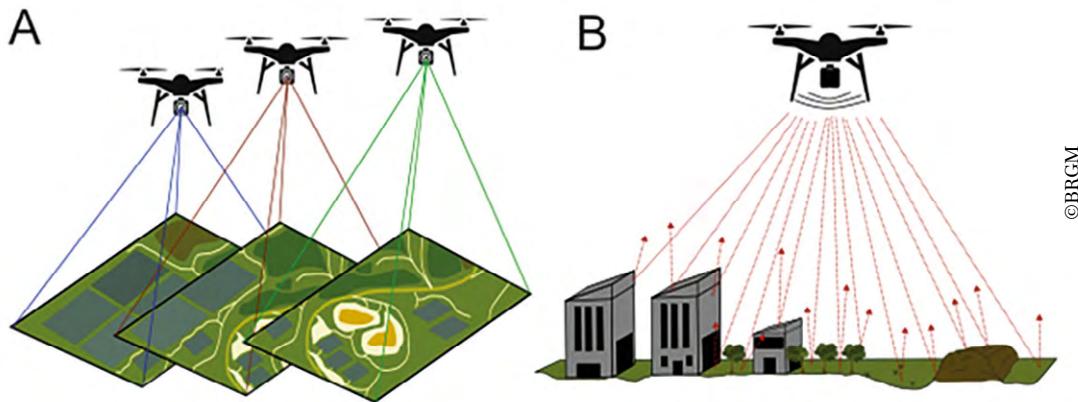
- Certaines **méthodes de caractérisation des microplastiques** peuvent être combinées comme la FTIR, le μ RAMAN et la Pyrolyse GC-MS sur les sites où une pollution par les microplastiques est avérée ou suspectée afin d'identifier la nature chimique, la quantité et l'état de vieillissement des microplastiques présents.

Quelles sont l'extension et la répartition de la pollution ?

- Les **techniques géophysiques** permettent de déterminer l'extension latérale et verticale des polluants dans le sol et dans la nappe à partir des variations de propriétés physiques, sous réserve d'avoir un contraste suffisant entre la pollution et l'encaissant. Les investigations physiques classiques avec l'échantillonnage des milieux considérés complètent les informations fournies par la géophysique.
- Les **méthodes de télédétection aéroportée** permettent de modéliser finement le relief du terrain, révélant les zones favorables à l'accumulation ou au transfert de polluants. L'observation indirecte de l'évolution de la végétation et des mouvements de terrain peut aussi fournir des indices indirects sur la présence de pollution pouvant offrir une vision globale de l'extension de la contamination en complément de l'échantillonnage.
- Les **biotests ou bioessais** dits de court-terme c'est-à-dire identifiant une exposition aiguë permettent d'identifier sur une grande surface les zones qui méritent le plus d'attention pour le diagnostic. Ces techniques de laboratoire standardisées exposent des organismes à des sols ou eaux prélevées sur site. La différence de réaction des organismes selon les zones prélevées aide à la localisation des investigations pour des analyses chimiques classiques.



Tomographie de résistivité électrique 3D pour localiser une contamination par des DNAPL autour d'un lotissement.



Principe de fonctionnement des techniques de télédétection aéroportée (A : Photogrammétrie, B : LiDAR).

- Le **phytoscreening** détermine l'extension de la pollution dans le sol et dans la nappe à partir d'échantillons de bois prélevés sur des arbres ou arbustes. Les investigations sont rapides, peu coûteuses et non-invasives. Les résultats donnent une mesure semi-quantitative de la pollution, sur la profondeur des racines. Cette technique est un outil d'aide dans le choix d'implantation de sondages et piézomètres.
- 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, informent sur la répartition des éléments traces métalliques dans les différentes phases du sol et donc sur leur mobilité dans les conditions du milieu (disponibilité environnementale) et leur potentiel de mobilité si les conditions varient.
- Les **techniques de caractérisation minéralogique** sont des techniques d'imagerie ou d'analyse globale qui peuvent indiquer la répartition des éléments traces dans les minéraux présents. Les résultats obtenus peuvent être utilisés comme données d'entrée à la modélisation géochimique pour prédire la mobilité de certains éléments.
- 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 **techniques d'analyse ou de mesure de terrain** permettent d'obtenir des informations sur la présence (résultats qualitatifs) et la quantité (résultats semi-quantitatifs à quantitatifs) de polluants pendant la phase de terrain. 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. Parmi les techniques innovantes, la **PXRF** quantifie les polluants inorganiques à partir d'un prélèvement de sol et les **essais d'extraction des gaz du sol** permettent de localiser les pollutions organiques au sein de la zone non saturée à partir d'une extraction des gaz du sol pilotée en temps réel. Parmi les techniques éprouvées, la **MIP** permet de caractériser en temps réel l'extension verticale et horizontale d'une pollution par des COV et hydrocarbures dans les sols et gaz du sol. Le **PID** détecte principalement les COV dans l'air ambiant ou les gaz du sol, permettant d'identifier en temps réel les zones impactées en surface ou en sous-sol peu profond.
- 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 informent sur l'extension verticale du panache de pollution dans la nappe et permettent une meilleure caractérisation chimique verticale.
- Certaines **méthodes de caractérisation des microplastiques** peuvent être combinées comme la FTIR, le μ Raman et la Pyrolyse GC-MS sur les sites où une pollution par les microplastiques est avérée ou suspectée afin d'identifier la nature chimique, la quantité et l'état de vieillissement des microplastiques présents sur un site et ainsi déterminer l'ampleur et l'extension de la pollution.

Quelle est l'origine de la pollution ?

- Les **techniques géophysiques** permettent d'identifier, à partir des variations de propriétés physiques des objets enfouis (cuves, réseaux, déchets) qui peuvent être à l'origine de source de pollution (sous réserve d'avoir un contraste suffisant entre la cible et son encaissant). Les investigations sont non-intrusives et leur rendement est optimal sur de grandes surfaces.
- Les **outils isotopiques** permettent d'identifier la source de polluants dans les sols ou les eaux souterraines. Grâce aux différences de rapports isotopiques, ils permettent de distinguer les sources naturelles des sources anthropiques ou différentes sources industrielles mais aussi d'identifier l'origine d'une molécule organique (produit initial ou métabolite de dégradation). Ces outils interviennent en complément des analyses chimiques en forensie.
- La **dendrochimie** apporte des informations sur l'historique de la pollution à partir de carottes de bois prélevées sur des arbres. Les investigations sont rapides, peu invasives et donnent une mesure semi-quantitative de la pollution. Cette technique complète les techniques chimiques classiques en

analysant des marqueurs chimiques de certains polluants dans les cernes du bois pour dater des pics de pollution.

- Les **essais d'extraction des gaz du sol** permettent de localiser une ou plusieurs sources de pollutions organiques volatiles ou de mercure (Hg°) au sein de la zone non saturée grâce à une extraction des gaz du sol pilotée en temps réel. L'interprétation des résultats donne une information spatiale sur la source de pollution, potentiellement en zone inaccessible.

LE DIAGNOSTIC PERMET DE CARACTÉRISER CERTAINS IMPACTS DE LA POLLUTION SUR LES MILIEUX

Quelle est la biodisponibilité/bioaccessibilité des polluants et les transferts potentiels ?

- Les **outils isotopiques** sont un indicateur pour la biodisponibilité. Ils étudient à travers un prélèvement de sol, d'eau ou d'air le phénomène de dégradation des polluants par les microorganismes. Ces outils interviennent en complément des analyses chimiques et donnent une information indirecte via l'état de dégradation des polluants.
- Les **bioindicateurs d'accumulation** sont des outils de terrain qui visent à évaluer la biodisponibilité et l'accumulation des polluants du sol dans les organismes vivants (animaux ou végétaux). La mesure de ces bioindicateurs se fait en laboratoire ou *in situ* et les résultats des investigations renseignent de manière qualitative sur l'état du sol en place et de manière quantitative sur les risques de transfert des contaminants vers l'écosystème. Ils permettent de cibler les zones où le risque de transfert et de bioaccumulation est le plus important.
- La **bioaccessibilité orale** dans les sols est une méthode analytique en laboratoire permettant d'évaluer la biodisponibilité des polluants pour l'être humain. Elle permet de quantifier la fraction de polluant capable d'être réellement assimilée par l'organisme. L'évaluation des expositions et des risques est ainsi affinée et permet une optimisation de la gestion des sites. Une méthode d'analyse simplifiée avec acide chlorhydrique (HCl) permet d'estimer la bioaccessibilité orale en tant que démarche exploratoire à moindre coût afin de choisir les échantillons de sol à valider par une méthode normalisée dite « UBM » plus proche des conditions physiologiques mais plus longue et plus coûteuse.

● 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 techniques, en complément de l'analyse de la teneur totale, informent sur les interactions et l'affinité du polluant pour les autres constituants du sol et donc sur sa biodisponibilité et la bioaccessibilité mais aussi sur l'accumulation du polluant dans les denrées alimentaires.

● 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. Les résultats obtenus peuvent être utilisés comme données d'entrée à la modélisation géochimique pour expliquer des variations de bioaccessibilité orale des éléments traces métalliques dans les sols et appréhender des gammes faibles ou fortes de bioaccessibilité.

Quelle est la toxicité des polluants ou de la matrice sur l'être humain et l'environnement ?

- Les **techniques de biologie moléculaire** permettent de connaître les populations de microorganismes naturellement présentes. La diversité et l'abondance des microorganismes fournissent ainsi des informations sur l'impact de la pollution sur la biodiversité. Les prélèvements sur site de sol, d'eau, d'air ou de déchets sont complémentaires aux prélèvements pour analyse microbiologique classique.
- Les **biotests ou bioessais** permettent de quantifier les effets écotoxicologiques d'une pollution sur une population d'organismes. Ces essais en laboratoire sur des prélèvements de sol sont standardisés et peuvent être qualitatifs ou quantitatifs.
- 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 techniques, complémentaires aux analyses chimiques classiques, informent sur les concentrations des différentes formes chimiques et donc sur la toxicité et le choix de la VTR (valeur toxicologique de référence spécifique à la forme chimique) à utiliser et permettent de mieux appréhender les risques sanitaires. De même, ces techniques permettent de choisir les données écotoxicologiques spécifiques et les concentrations sans effet prévisible pour l'environnement associées à la forme chimique en présence.



Les bioindicateurs évaluent la biodisponibilité et l'accumulation des polluants du sol dans les organismes vivants.