

CECILE LE GUERN - DE LA CARACTÉRISATION A LA REMÉDIATION

Bonjour à tous. Comme le disait Thierry, mon exposé va porter plus particulièrement sur les aspects de caractérisation. Le sommaire prévu, on va commencer par quelques mots sur l'importance de la caractérisation, les conditions d'une caractérisation pertinente et utile, pour ensuite aller vers les outils de caractérisation sur site et quelques éléments de conclusion.

L'importance de la caractérisation. C'est vrai que dans la gestion des sols contaminés, la caractérisation est un prérequis important mais une question préliminaire, c'est : « Caractériser, pour quoi faire ? », « Quoi caractériser ? », « Où caractériser ? », « Comment caractériser ? », « Avec quels moyens ? ». Donc, c'est important notamment dans les diagnostics. Comme vous le savez, on s'appuie pour cela sur le schéma conceptuel qui nous permet de formuler un certain nombre d'hypothèses qu'on va aller vérifier soit par des recherches documentaires plus complémentaires soit par des mesures sur site et dans ce cadre-là, les investigations de terrain sont importantes. Et donc, ces données nous permettent de vérifier les hypothèses et d'enrichir le schéma conceptuel. On se place dans une démarche itérative de plus en plus détaillée. Dans le cadre du diagnostic, c'est important d'investiguer le terrain pour connaître précisément l'extension spatiale d'une contamination, identifier les voies de transfert et d'exposition, les milieux d'exposition, les cibles à protéger. On va revenir un petit peu sur les différentes questions.

Première question à se poser, c'est : « Quels objectifs sur les investigations de terrain ? ». On a vu le diagnostic mais ça peut être utile pour d'autres aspects, comme la surveillance, pour suivre l'évolution d'une contamination dans le temps et l'espace, et pour des aspects de gestion aussi, pour contrôler l'atteinte des objectifs de réhabilitation, et aussi beaucoup pour contrôler la qualité des terres à excaver dans le cadre des projets d'aménagement pour en assurer une filière d'évacuation ou de valorisation adaptée.

On a vu les objectifs d'une caractérisation mais comment est-ce qu'on a une caractérisation qui est pertinente et qui est utile ? Le principe que vous connaissez tous, c'est qu'on mène une approche au cas par cas et dans ce cadre, le schéma conceptuel, c'est la base de notre réflexion. Alors, on doit aussi prendre en considération les enjeux de la caractérisation. Les enjeux peuvent être sanitaires – c'est souvent le cas – ça peut être des enjeux par rapport à une ressource – comme les eaux souterraines – ou par rapport plutôt à des objets, enfin la gestion des terres excavées, notamment dans le cadre des projets d'aménagement. Alors, ça nous mène à avoir des prélèvements différents. Par exemple, pour les établissements sensibles qui ont vraiment une vocation sanitaire, on va s'intéresser aux sols de surface et aux gaz du sol puisqu'on va prendre en considération comme expositions possibles l'ingestion de sols, l'inhalation de poussières et l'inhalation de gaz par des jeunes publics. Les enjeux sanitaires peuvent aussi concerner les possibilités de culture de sols, notamment dans les jardins familiaux ou en agriculture urbaine ou agriculture plus générale. Donc là, on va considérer également l'ingestion de sols, l'inhalation de poussières mais aussi les possibilités de transfert vers les plantes, d'où le fait qu'on va prélever aussi des sols de surface mais sur la profondeur racinaire, donc sur des épaisseurs plus importantes que pour les établissements sensibles. Et on va s'intéresser aussi, donc, aux plantes. Alors, quand on s'intéresse à la ressource en eaux souterraines – notamment pour l'alimentation en eaux potables – là vous voyez bien qu'on a nécessité de se préoccuper de la surface vers la profondeur, donc toutes les sources et les transferts du sol, sous-sol, sur quelques mètres de profondeur jusque vers les eaux souterraines. Quand on s'intéresse à la gestion des terres excavées – dans le cadre de l'aménagement – la profondeur d'investigation va dépendre des profondeurs d'excavation envisagées par rapport aux aménagements envisagés.

Alors, pour caractériser de manière pertinente et utile, il faut bien sûr se poser la question : « Quels contaminants on va aller rechercher ? » et « Quels milieux on va aller prélever ? ». Dans ce cadre, l'étude historique et documentaire nous permet d'identifier un certain nombre de sources de pollutions potentielles ou avérées et de se poser la question de mobilité des contaminants, et donc de voir quels milieux sont impactés : si ce sont les sols, les eaux souterraines ou superficielles, l'air, les végétaux. Pour ma part, dans la suite de l'exposé, je m'intéresserai uniquement au volet « sols ». Donc, l'étude historique et documentaire, elle est aussi importante pour nous aider à identifier les contaminants, qu'ils soient historiques ou actuels, qu'ils soient liés aux activités anthropiques – sur place ou à proximité – ou aux matériaux de remblais que l'on rencontre notamment énormément en milieu urbain, tout en, bien sûr, utilisant notre taux d'expérience. Concernant les contaminants, on va s'intéresser aussi au contexte environnemental : « Quel est le fond géochimique ? », « Est-ce qu'il existe des référentiels ou des teneurs usuelles locales ? », « Est-ce qu'on est susceptible d'avoir des anomalies naturelles ? ».

Ici, un exemple d'illustrations d'étude historique et documentaire. C'était l'étude d'un jardin familial où finalement, en termes d'histoire industrielle, y'avait rien – pas dans un contexte vraiment purement agricole, des champs jusque dans les années 50, 60. Et puis ce qui a alerté notre attention, ce sont, au moment de la construction du périphérique – c'est un jardin nantais – des remblais routiers qui ont été stockés sur ce site avant que le site ne soit transformé en jardin familial. Donc, au moment des investigations, on a retrouvé de l'arsenic, des teneurs en arsenic, qu'on a pu finalement associer à ces remblais routiers qui étaient dans... Sur Nantes, on a ouvert une carte – on a pas mal de micaschistes avec des enrichissements locaux – et cet arsenic était finalement lié à des matériaux naturels déplacés mais donc, à des remblais. Cet exemple souligne à la fois les aspects de fonds géochimiques naturels et d'anomalies potentielles et de remblais – mêmes naturels – qui peuvent être déplacés et du coup, c'est une source d'explication importante.

Une fois qu'on sait quels milieux prélever et quels contaminants rechercher, c'est : « Comment est-ce qu'on s'y prend ? », « Où est-ce qu'on peut mesurer ? », « Où est-ce qu'on peut prélever ? ». Donc là, le schéma conceptuel est bien utile pour savoir – vous vous souvenez, le premier schéma conceptuel – savoir si ça va être plutôt les sols de surface, les eaux souterraines, sur quelle épaisseur on va aller, en fonction aussi des enjeux. Dans ce cadre, on définit une stratégie d'échantillonnage qui est liée aux objectifs et aux moyens avec un nombre d'échantillons, une profondeur d'échantillonnage, une répartition, avec une difficulté liée à l'hétérogénéité des milieux naturels et des milieux urbains et à la nécessité aussi d'avoir des échantillons de référence pour les sols. Juste une petite illustration ici de la difficulté d'avoir le bon échantillonnage qui soit représentatif d'un milieu hétérogène et pour illustrer qu'on fait toujours une erreur importante quand on prélève. L'erreur d'échantillonnage, c'est une erreur importante à prendre en considération ensuite quand on va interpréter les résultats.

Une petite illustration sur les différentes manières d'aborder l'échantillonnage. On peut aborder l'échantillonnage d'une manière totalement aléatoire – comme illustrée sur ce premier schéma – ou avoir un échantillonnage plus systématique – ce qui est d'ailleurs plus pratiqué – c'est-à-dire, on maille et on échantillonne au sein de chaque maille. Sachant qu'on peut aussi cibler plus précisément sur un endroit ou un autre quand une question précise se pose.

Quelques mots sur le... par rapport aux sols, sur les échantillons de référence. Quand on veut avoir une référence par rapport au fond pédo-géochimique, ce n'est pas toujours évident. On a des référentiels mais ça nécessite de vérifier si c'est utilisable ou pas. Donc, quand on se situe dans un endroit... quand on a un sol qui est proche du milieu naturel, l'important c'est de vérifier qu'on a des sols qui sont développés sur une même formation géologique puisque différentes formations géologiques – même si elles sont proches – peuvent avoir des contextes et des propriétés géochimiques différentes, et puis bien sûr s'intéresser au contexte anthropique : « Est-ce qu'il y a eu

des activités impactantes, actuelles ou passées, à l'endroit où on veut prélever ? ». Le milieu urbain, lui, est particulièrement compliqué. Il s'agit d'éviter des sols apportés trop récemment puisqu'ils ne vont pas être représentatifs du milieu urbain dans son ensemble et des apports de pollution diffuse de longue date. Donc, il y a une proposition d'aller vers des espaces verts anciens mais une question qui se pose par rapport aux remblais : « Qu'est-ce qu'on fait quand on est sur des remblais ? ». Une fois qu'on sait où on va échantillonner, après c'est : « Quels outils on va utiliser et quels moyens on va utiliser pour aller vers des résultats analytiques ? ». Les choix vont, bien sûr, être fonction des objectifs, des connaissances sur le système étudié mais aussi des moyens qui vont pouvoir être mis en œuvre et qui vont dépendre des enjeux économiques et sanitaires. Le choix va être, bien sûr, fonction des paramètres recherchés mais on ne va pas forcément rechercher que les contaminants, il y a d'autres paramètres qui peuvent être utiles et pertinents à acquérir. Par exemple – je pense aux sols – ça peut être simplement une observation des sols sur la texture, les couleurs, les odeurs, des matériaux particuliers qui vont être présents dedans. La complémentarité des outils mais aussi des compétences des personnes sont importants à mettre en place puisqu'on peut avoir des mesures *in situ*, sur site, au laboratoire – avec des méthodes qui peuvent être destructives, non destructives – tout ce qui est préparation d'échantillons, transport, extraction éventuelle, qui sont aussi des volets importants de la chaîne d'étude des sols qui doivent être pris en considération avec sérieux et ça nous permet, du coup, d'avoir une approche ponctuelle mais aussi spatiale et temporelle. Donc on a un volet très complet.

Quelques mots sur les outils de caractérisation qui sont nombreux – comme je viens de le dire, on peut les mettre en œuvre *in situ*, sur site, au laboratoire – et puis par rapport au sol. Le sol, c'est une matrice hétérogène et complexe qui contient différents constituants en phase solide, en phase liquide, en phase gazeuse. Donc, les polluants qui interagissent avec ces composants peuvent être présents dans ces trois phases. On peut être amené – en fonction des polluants et des milieux et des types de comportements – à caractériser les polluants dans ces trois phases. Pour cela, il existe des protocoles avec des normes, des règles de l'art. Il y a des choses qui sont bien établies mais il y a aussi des nouveautés issues de la recherche et développement. C'est plus sur ce volet que je vais parler maintenant des outils de caractérisation sur site des contaminations de sols. On va s'intéresser à ces outils, donc je vais commencer par évoquer l'intérêt et les limites des mesures sur site, vous évoquer les principaux outils de mesure mais je vais plus me focaliser sur la fluorescence X portable pour laquelle je vais illustrer quelques cas concrets d'utilisation. Et ensuite, on ira vers quelques conclusions et perspectives sur ces outils. L'intérêt et les limites des mesures sur site sont nombreux. C'est, d'une part, la flexibilité, la réactivité, la coopération avec le laboratoire – c'est des choses qu'on va illustrer dans les cas concrets. Parmi les intérêts, c'est la possibilité de screening, c'est-à-dire de mesurer sur de nombreux échantillons et donc d'avoir une forte densité de points de mesures. Ça permet aussi d'aider à la stratégie d'échantillonnage que l'on peut adapter, rendre dynamique. Ça aide aussi à baisser les incertitudes et donc à augmenter la crédibilité des décisions qui sont prises et bien sûr, les résultats peuvent servir d'aide à la décision. Les limites de ces outils, c'est que souvent, on est quand même plutôt dans du semi-quantitatif et qu'il y a nécessité de caler les résultats avec le laboratoire au moins sur une sélection d'échantillonnage. Donc, je reviens ici sur l'importance de l'échantillonnage avec... Tout à l'heure, j'évoquais l'erreur d'échantillonnage et ici, ces petits schémas illustrent juste que dans des pratiques conventionnelles, l'erreur d'échantillonnage est nettement supérieure à l'erreur d'analyse. Ces outils de mesure sur site ont l'intérêt de permettre de réduire cette erreur d'échantillonnage et donc de baisser les incertitudes. Alors, ce petit tableau illustre les principaux outils de mesure sur site pour les sols avec des techniques qui sont utilisées couramment – comme la fluorescence X, la mallette colorimétrique pour les hydrocarbures totaux – des techniques utilisées plus rarement pour les HAP, les PCB, les volatiles mais aussi d'autres... enfin, HAP, PCB, et puis un certain nombre de techniques émergentes pour des métaux légers, des polluants organiques mais aussi des phases porteuses des polluants – comme les phases minérales hydrolysées comme les oxyhydroxydes de fer – ou des premières

approches de minéralogie de phase plus cristallisée avec la diffraction aux rayons X. Moi, je vais plus insister – je ne vais pas pouvoir vous les présenter tous – sur la fluorescence X portable. La fluorescence X portable, ça ressemble à un pistolet qui permet d’analyser les sols et d’avoir directement les résultats en direct. Donc l’intérêt, c’est que c’est une analyse multi-élémentaire qui se déroule en une ou deux minutes et qui donne accès à une grande partie du tableau de Mendeleïev – notamment tout ce qui est ici en bleu et vert – donc un certain nombre de métaux métalloïdes qu’on rencontre couramment dans les sites de sols pollués notamment. On est plutôt – en général – sur une mesure semi-quantitative mais on peut quand même tendre vers du quantitatif sous certaines conditions. Donc, l’utilisation est possible comme outil de diagnostic. Par une approche semi-quantitative, on peut faire une comparaison relative d’échantillons à différents endroits de la zone d’étude et on peut quand même faire un outil d’analyse pour certains éléments – sous certaines conditions – c’est-à-dire qu’on va voir que ça nécessite une préparation comme au laboratoire des échantillons. Alors, on parlera... Vous avez peut-être noté que je parle de mesures sur site et non d’analyse. L’analyse, on réserve cette notion-là vraiment pour le laboratoire.

Quelles sont les conditions pour une mesure pertinente ? Je reviens sur la représentativité de l’échantillon. On aura toujours une mesure mais si l’échantillon n’est pas représentatif, ça nous servira pas beaucoup. La qualité de la préparation de l’échantillon est aussi importante. Plus on se rapprochera de conditions de préparation proches du laboratoire, plus on tendra vers une mesure équivalente à une analyse. Ça, ça nécessite une homogénéisation des échantillons, une faible humidité ou en tout cas, une humidité connue ou équivalente. L’importance de la vérification au laboratoire avec des échantillons de calage et, de préférence, sur matrice équivalente parce qu’on peut avoir, dans certains cas, des effets de matrice. Donc là, juste pour montrer quelques exemples de calage. Ici, c’est des phosphates mesurés... En ordonné, c’est le résultat avec la fluorescence X portable. En abscisse, c’est l’équivalent en fluorescence X de laboratoire. Et vous voyez qu’on a une bonne corrélation mais un petit décalage, donc c’est important d’en être conscient et de le vérifier pour chaque site. Ici, ce sont de la même manière – là c’est pour le plomb – des teneurs en plomb sur le terrain sur échantillons bruts et les mêmes teneurs sur échantillons séchés et on voit qu’on a une déviation par rapport à l’humidité. Alors, on parlait de la préparation des échantillons. Ça, c’est les préparations d’échantillons complètes pour avoir une mesure qui soit équivalente à une analyse, avec échantillonnage, démottage, séchage, broyage, tamisage et séparation fractions fines et fractions grossières avant ici la mesure sur l’échantillon plus fin. Après, est-ce que c’est une étape indispensable ? Tout dépend de nos objectifs. On peut shooter directement sur le terrain pour appréhender et après, aller plus ou moins loin dans la préparation de l’échantillon en fonction de ce qu’on a besoin réellement. Maintenant, on va passer à quelques illustrations de l’utilisation de cette fluorescence X portable. Là, ça a été notamment pour une cartographie à l’échelle d’un territoire pour essayer d’appréhender les fonds géochimiques naturels avec, ici, ces petits graph qui montrent – pour le plomb, l’arsenic, le cuivre et le zinc – nos courbes de calage entre les mesures avec la fluorescence X portable et les vérifications au laboratoire – des droites de corrélation qui sont tout à fait probantes – un échantillonnage – ici sur l’ensemble du département de la Loire-Atlantique – et les résultats qui nous permettent de voir que, finalement, il y a un tiers du département de la Loire-Atlantique qui est concerné par des anomalies naturelles en arsenic – donc des anomalies fortes entre 50 et 100 mg par kilogramme de matière sèche. Autre exemple d’utilisation – c’est plus dans le cadre d’aide à la décision à l’échelle d’un site – ça c’est le cas du jardin des Eglantiers à Nantes sur lequel il y a eu une campagne de mesures sur les sols en focalisant plus particulièrement sur le plomb et l’arsenic. Les premières campagnes menées sur six points d’analyse avaient conduit à la fermeture complète du jardin. Arrêt total de la possibilité de cultiver par les jardiniers. Et en fait, cette cartographie – on est passé sur chaque parcelle – a permis d’identifier des anomalies en plomb et en arsenic, de combiner pour faire une carte de parcelles avec des anomalies et de faire évoluer l’arrêté pour ce jardin, et la moitié du jardin a pu rouvrir puisque finalement, on n’était pas concerné par des problèmes de plomb ou d’arsenic sur les sols. Et du coup, le plan de gestion a été mené sur l’autre

moitié du jardin. Ce qui a pu être – vous voyez, par rapport à une caractérisation qui est assez rapide et peu coûteuse – des économies considérables par rapport au plan de gestion. Quelques exemples... Quelques illustrations plutôt en photos de l'utilisation du fluorescence X portable avec les mesures mais, au préalable, une préparation des échantillons – soit sur place, soit retravaillés – une géolocalisation de chaque point de prélèvement pour pouvoir justement aller vers ces cartes et aussi, l'élaboration de profils de sols... enfin, la réalisation de profils de sols qu'on a analysés également et qui nous ont permis de déterminer l'origine des contaminants. Donc là, c'est des exemples issus d'autres jardins qu'on a étudiés notamment dans le cadre du programme « JASSUR » – ou ANR – où on voit que, ici par exemple, ce sont les teneurs en plomb et teneurs en zinc sur un même jardin en fonction de la profondeur. On constate que ces teneurs en plomb et en zinc sont nettement plus élevées en surface et décroissent très rapidement avec la profondeur, ce qui nous a permis d'évoquer une origine anthropique pour cette contamination. A l'inverse ici, on avait des teneurs en arsenic qui croissaient avec la profondeur et en observant les profils de sols, on se rendait compte qu'on descendait vers la roche mer, tout simplement. Et donc on a pu mettre en évidence une origine naturelle. Avec juste ici, pour le plomb et le zinc – j'ai oublié de le dire – une corrélation entre les deux qui présage d'une origine équivalente. Donc, l'importance des observations est primordiale par rapport aussi aux interprétations sachant que l'avantage du fluo X portable, c'est aussi qu'au-delà de pouvoir analyser les sols, les milieux environnementaux, on peut aussi analyser des matériaux et ça, nous, on l'avait utilisé par rapport à des anomalies très très ponctuelles en plomb qu'on avait finalement... Le jardinier nous avait dit : « Oh, il y a eu une peinture du pylône y'a un an, ça avait éclaboussé un peu partout ! ». On est allé analyser la peinture du pylône et c'était – comme par hasard – les mêmes concentrations que les anomalies ponctuelles dans le sol. La place des mesures sur site, elle est tout à fait pertinente dans l'étude des pollutions de sols et contaminations. On a une bonne complémentarité entre les outils de terrain et de laboratoire et c'est un outil qui n'a pas toujours lieu d'être mais qui peut être vraiment intéressant à considérer lorsqu'on a besoin de résultats immédiats ou qu'on a des contraintes majeures de budget – sachant qu'il faut toujours garder de la ressource pour vérifier les analyses de qualité au laboratoire – et puis ça peut aussi apporter des bénéfices pour des recherches orientées, pour adapter les investigations, pour sélectionner des échantillons pour le laboratoire et même pour revenir sur d'anciens échantillons qu'on a pu garder.

Quelques conclusions maintenant. Par rapport à la caractérisation, des points d'attention : bien sûr, se poser les bonnes questions – on est toujours dans une approche au cas par cas – la qualité de l'échantillonnage – comme je l'ai dit, qui est importante – réussir à prélever des échantillons représentatifs par rapport à l'hétérogénéité, choisir les bons paramètres, la qualité de l'analyse et de la mesure qui va dépendre des conditions de conservation, de préparation des échantillons, mais aussi toute la chaîne d'analyse – calibration, extraction, suivi qualités avec l'utilité des blancs à différentes étapes – important à avoir en tête, les sources d'incertitudes sur les endroits de prélèvements et les différentes sources d'incertitudes lors de l'interprétation des résultats – donc là, je renvoie vers l'exposé de Franck Marot qui va suivre – et donc une caractérisation pertinente et de qualité – c'est vraiment important – c'est un gage de gestion optimale, que ce soit pour évaluer les risques et les compatibilités d'entre l'état des milieux et des usages que pour mener des actions de gestion adaptée – s'il y a besoin, s'il n'y a pas de compatibilité entre l'état des milieux et des usages. Les actions de gestion pourront être variées. On parle de la remédiation – du traitement qui peut être sur site ou hors site – mais il y a plein d'autres mesures de gestion qui sont l'excavation, les mesures de constructions actives ou passives, le confinement, l'atténuation naturelle. Et puis ces données de caractérisation vont être utiles aussi dans le cadre des traitements de la remédiation, à dimensionner ces actions. Enfin, la caractérisation est importante par rapport aux enjeux économiques et sanitaires. Une bonne caractérisation peut limiter les mauvaises surprises qui vont engendrer des retards, des surcoûts, des images, mais on est toujours dans un compromis entre des enjeux et des moyens, des coûts qui vont être disponibles – donc ça c'est la grosse difficulté – mais

en ayant en tête que le coût de caractérisation est toujours inférieur au coût de dépollution. Ça fait partie des points de négociation, des arguments en tout cas pour essayer d'avoir les moyens nécessaires pour faire une bonne caractérisation. A titre d'illustration d'enjeux économiques – par rapport aux enjeux économiques d'une bonne caractérisation – l'exemple de gestion des terres excavées entre différentes modalités d'échantillonnage. Ici, des échantillonnages simplement en fonction de la profondeur indépendamment des lithologies rencontrées dans les prélèvements. Par rapport aux filières d'évacuation – si on prend une évacuation de matériaux non contaminés à 8 €/tonne par rapport à un matériau un peu contaminé qui sera plutôt à 80 €/tonne – si sur un site on a mille tonnes d'écart d'évacuation, on arrive à 72.000 €. Ça, c'est des coûts qui sont quand même loin d'être négligeables, notamment par rapport au coût moyen d'un plan de gestion qui est entre 30.000 et 100.000 €, et encore moins par rapport à des coûts de dépollution qui peuvent dépasser les 500.000 €. Voilà. C'était juste pour terminer sur cette petite illustration des enjeux économiques.

Je vous remercie pour votre attention et si vous avez des questions, n'hésitez pas !