



5

e RENCONTRES NATIONALES

de la Recherche sur
les sites et sols pollués

04 et 05 février 2025
Palais des congrès - Paris



SYNTHÈSE MULTIMÉDIA

SOMMAIRE

Animateur :
Valéry Dubois,
journaliste



| **Les plénières : l'essentiel à retenir...p.03**

| **Les ateliers thématiques...p.07**

| **La synthèse des principales
pistes de Recherche...p.32**

Ce document est édité par l'ADEME

ADEME - 20, avenue du Grésillé - BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Coordination technique : Yves Duclos (ADEME) - Rédacteurs : comité scientifique des 5^e RNR SSP - Création graphique : Caracter - Crédits photos/vidéos : Christophe Sroka -
Crédits illustrations : Françoise Poitou

Brochure réf. 013053 / EAN numérique : 9791029725814 / Dépôt légal : ©ADEME Éditions, octobre 2025 - Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Les plénières : l'essentiel à retenir • J1 & J2

Ouverture des 5^e Rencontres

Baptiste Perrissin-Fabert, Directeur
général délégué, ADEME



B. Perrissin-Fabert

Les sols occupent une place centrale dans le fonctionnement des écosystèmes terrestres. Cependant, les activités humaines intensifient les pressions sur les sols. Ces tensions conduisent à une dégradation des sols qui menace leur capacité à remplir leurs fonctions écologiques. Selon l'Union européenne, 60 % des sols sur son territoire sont déjà affectés.

Malgré une prise de conscience croissante du rôle essentiel des sols dans la lutte contre la perte de biodiversité et le chan-

gement climatique, leur protection reste insuffisamment intégrée dans les processus décisionnels.

L'ADEME contribue depuis plusieurs années à mieux ancrer la santé des sols au cœur des politiques publiques, en concentrant ses efforts sur trois axes principaux : évaluer l'état de santé des sols, promouvoir leur gestion durable et contribuer à leur restauration.

Dans ce contexte, les 5^e RNR SSP sont synonymes d'échanges, de convivialité et de partage. Les riches débats en ateliers permettent d'ouvrir les réflexions et de questionner les besoins en matière de recherche et d'innovation. Ces journées sont ainsi l'occasion d'identifier et de renouveler les perspectives et les orientations prioritaires en matière de recherche pour les 5 prochaines années.

L'ADEME contribue depuis plusieurs années à mieux ancrer la santé des sols au cœur des politiques publiques.

Sol et santé

Marc André Selosse, Professeur,
Muséum National d'Histoire Naturelle



MA. Selosse

cette ressource vitale. Puisque prendre soin des sols c'est prévenir les maladies, mieux se nourrir, protéger notre environnement et soutenir une agriculture durable.

Prendre soin des sols, c'est prévenir les maladies, mieux se nourrir, protéger notre environnement.

Le lien entre la santé des sols, et celle des êtres humains est très étroit. Les sols ne sont pas de simples supports inertes, mais des écosystèmes vivants abritant une biodiversité essentielle à notre survie. Ils nous rendent par ailleurs de nombreux services écosystémiques (régulation du cycle de l'eau, filtre naturel, support de production végétale, etc.).

Il est important que s'opère une prise de conscience collective et que se mettent en place des actions concrètes pour protéger

Avancées européennes sur la santé des sols

Esther Goidts, Conseillère,
Service Public de Wallonie



E. Goidts

La Directive européenne sur la surveillance et la résilience des sols vise à établir un cadre commun pour surveiller, protéger, restaurer et utiliser durablement les sols dans l'Union européenne. Elle a pour objectif d'assurer des sols sains d'ici 2050.

La Directive s'inscrit dans une dynamique d'évolution de la notion de santé des sols. Comme le souligne Marc André Sélosse, la notion de santé des sols est récente, mais elle constitue le fruit d'une longue évolution en termes de gestion des enjeux sols. Afin de proposer des textes en cohérence avec cette évolution, un dialogue européen a notamment été engagé.

La version finale de la Directive sur la surveillance et la résilience des sols sera soumise en plénière du Parlement européen en octobre prochain.

Enjeux territoriaux de préservation de la santé des sols

Jamila Bentrar, Coordinatrice Quartiers
fertiles, Métropole Européenne de Lille



J. Bentrar

La reconversion des friches polluées constitue un enjeu majeur dans les stratégies de sobriété foncière impliquant des disciplines variées, notamment les sciences du sol, (agronomie, pédologie, chimie, biologie, écologie), mais également les sciences humaines, économiques et sociales.

Les pollutions des sols présentent des risques sanitaires et environnementaux complexes à évaluer, car liées aux spécificités locales des sols.

La réhabilitation des sols vers des usages alternatifs tels que la création de parcs urbains, de continuité écologique ou de zones naturelles prend de l'importance en réponse aux enjeux écologiques. Il s'agit de restaurer les fonctions des sols dégradés et de fournir les services éco-

systemiques indispensables pour rendre les territoires plus résilients (lutte contre les inondations, lutte contre la perte de la biodiversité, lutte contre les îlots de chaleur urbains, etc.).

Des Solutions fondées sur la Nature (SfN) comme la phytostabilisation, le génie-écologique (apport d'amendements) ou la reconstruction de sols via le génie-pédologique permettent d'apporter des réponses à ces enjeux environnementaux. La mise en place de ces méthodes exige des approches intégrées, incluant une réduction du risque sanitaire lié à une pollution résiduelle. Ces méthodes sont encore peu reconnues et nécessitent aujourd'hui un accompagnement via des guides techniques afin de les rendre plus opérationnelles et un partage de retours d'expérience pour généraliser les bonnes pratiques.

La réussite passe aussi par l'implication des citoyens via la science participative. Enfin, il faut penser à conserver la mémoire des pollutions des sites pour garantir la pérennité des mesures de gestion.

 **Les Solutions fondées sur la Nature permettent d'apporter des solutions.** 

Dynamique de l'activité de recherche sur les sites et sols pollués

Frédérique Cadière, Cheffe de service adjointe, ADEME



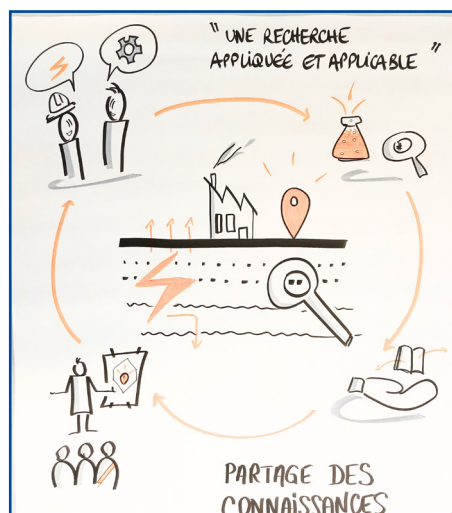
F. Cadière

La recherche soutenue financièrement par l'ADEME sur les sites et sols pollués vise la mise en œuvre opérationnelle de ses résultats. C'est donc « *une recherche appliquée et applicable* ». Pour atteindre cette ambition, l'Agence :

- **organise des échanges** entre acteurs pour orienter les actions de recherche en réponse aux besoins des utilisateurs finaux (tel par exemple le réseau ESSORT),
- **finance des projets collaboratifs** incluant les acteurs économiques et en capacité de porter le transfert des connaissances et des innovations (via des appels à projets de recherche [APR] tels Gesipol, Graine, Impacts, Aqacia, Tees) et soutient la mise en réseau de dispositifs expérimentaux (sites ateliers, plateformes expérimentales...),

- **partage les informations sur les projets et les connaissances acquises** (recherche.ademe.fr), et, en tant qu'utilisateur précurseur, diffuse son retour d'expérience terrain sur les innovations et accompagne les évolutions des politiques publiques.

Tous les résultats de recherches présentés lors des Rencontres viennent réinterroger les bases de notre programmation, c'est le sens du cycle de bilan et de perspectives.



« La recherche soutenue par l'ADEME est une recherche appliquée et applicable. »

Le mot des présidents du comité scientifique des 4^e et 5^e Rencontres

Nathalie Guiserix présidente d'INNOVASOL et référente sites et sols pollués chez RENAULT & Olivier Atteia, Professeur, UMR EPOC/Innovasol



O. Atteia & N. Guiserix

Les RNR offrent l'intérêt d'interroger les liens entre la **Recherche** et ce qui se fait opérationnellement par les **acteurs de terrain**, d'interagir entre communautés et d'articuler les partenariats et transferts de connaissance public/privé.

Les remerciements vont à l'équipe projet, aux membres du Comité Scientifique et à tous les partenaires de l'événement pour leurs implications indispensables, ainsi qu'aux intervenants et aux participants.

Ces journées mettent en évidence que de nombreux sujets relèvent plutôt du champ du transfert des connaissances dans les pratiques (réglementaires, méthodologiques, appropriation par les acteurs...) que de besoins de développement de nouvelles connaissances.

Cela appelle à sortir des sentiers battus pour renforcer les conditions de partage de **retours d'expériences** (comme la capitalisation des situations critiques pour définir les fenêtres opérationnelles des traitements des pollutions), voire à ouvrir un accompagnement en sociologie pour tester un volet de prise de décision par les parties prenantes.

Une question récurrente porte sur le « **changement d'échelle** » des résultats de recherche, maillon indispensable de leurs passages du pilote / démonstrateur vers le terrain réel et/ou vers les conditions de leurs généralisations sur différentes configurations de sites.

Dans le domaine des SSP, avec un marché en croissance modérée qui attire peu les investissements, la prise de risque vers l'innovation nécessite d'être accompagnée, avec des **relais financiers** et le plein **soutien de la profession et des autorités**.

Dans les domaines émergents, comme par exemple les PFAs, il semble qu'une plus grande transparence et une coordination renforcée seraient utiles pour relever les immenses défis liés à ces substances.

« La prise de risque vers l'innovation nécessite d'être accompagnée. »

Les incertitudes dans le domaine des SSP

Dominique Guyonnet, BRGM
& Philippe Monier, Indépendant

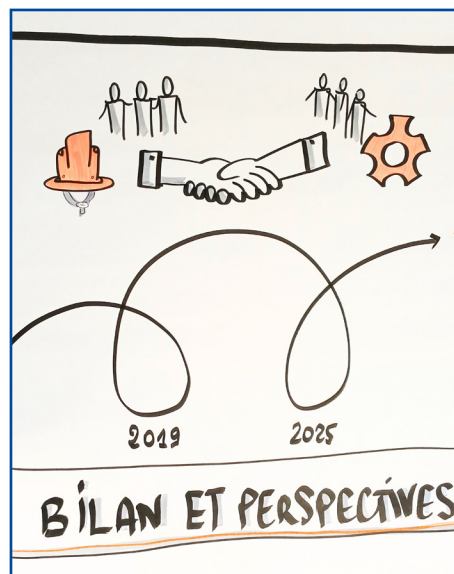


D. Guyonnet & P. Monier

Lors des 5^e RNR SSP, D. Guyonnet (BRGM) et P. Monier (TERR-EAU) ont rappelé que chaque étape du cycle de la donnée, de l'échantillonnage jusqu'aux décisions de gestion, est susceptible de générer ou d'être affectée par des incertitudes, qu'elles soient stochastiques (liées à la variabilité naturelle) ou épistémiques (liées au manque de connaissance).

Leur message central : **reconnaître et formaliser l'incertitude n'est pas une faiblesse, mais une démarche de rigueur et de transparence** au service d'une meilleure gestion des risques et d'une prise de décision plus robuste. À cette fin, le groupe de travail « Incertitudes », mis en place en 2021, a produit deux outils majeurs : une check-list de 94 points critiques pour guider les praticiens et le concept

de « seuil flou », permettant d'exprimer les résultats sous forme d'intervalles plutôt que de valeurs uniques, afin de mieux refléter le niveau de connaissance réel et sécuriser les décisions.



« Réinterroger les besoins et les résultats de recherche »

Clôture et remise des prix meilleurs posters

Anne-Cécile Sigwalt, Directrice exécutive adjointe de l'expertise et des programmes, ADEME



AC. Sigwalt

Nous l'avons constaté pendant ces journées : les sols sont au cœur de multiples enjeux de résilience des socio-écosystèmes pour pouvoir faire face aux changements globaux et mieux encaisser les chocs à venir.

Ils constituent un levier important pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique. Ils sont aussi au cœur des actualités politiques tant au niveau européen qu'au niveau national. Pour faire face à tous ces enjeux, **l'ADEME contribue au soutien d'une « Recherche appliquée et applicable ».**

L'ambition de ces 5^e RNR est d'offrir un espace de rencontre, et d'échanges dans un cadre convivial, mais aussi de réinterroger les besoins de recherche et les résultats

de recherche. Puisque c'est dans cette dynamique que naissent de nouvelles perspectives et orientations de la recherche.

L'occasion également de récompenser/remercier les chercheurs pour leur travail. Les participants ont ainsi pu voter pour élire le « meilleur poster » et le « meilleur poster jeune chercheur ». Les lauréats de cette 5^e édition sont :

- **M. Philippe OUDIN** – Prix du « meilleur poster » avec son poster « *Application de la toxicologie In Silico à la gestion des PFA's* » ;
- **M. Alexis GRIS** – Prix du « meilleur poster jeune chercheur » avec son poster « *Optimisation des volumes de dépollution par modélisation analytique inverse* ».



A. Gris & AC. Sigwalt

I Les ateliers thématiques

- 1A - Nouvelles approches et outils de caractérisation in situ... p.08
- 1B - Outils de traitement et de cartographie des données... p.10
- 2A - Transferts gaz du sol/air intérieur et mesures constructives... p.11
- 2B - Transfert des pollutions dans les sols... p.12
- 3A - Approches intégrées de l'évaluation des risques environnementaux... p.14
- 3B - Nouvelles approches méthodologiques pour
l'évaluation de la toxicité et ecotoxicité des polluants... p.16
- 3C - Outils d'évaluation de l'exposition et des impacts sur le vivant... p.18
- 4A - Repousser les limites des traitements biologiques... p.20
- 4B - Injection de fluides pour la mobilisation des phases pures... p.21
- 4C - Applications innovantes de traitements des pollutions organiques... p.22
- 4D - Nouvelles approches pour la gestion des sites pollués par des PFAS... p.23
- 5A - Compatibilité des indicateurs environnementaux dans la gestion des sites pollués... p.24
- 5B - Nouvelles opportunités pour de nouveaux usages des fonciers délaissés... p.26
- 6A - Enjeux environnementaux et sanitaires de la requalification
des friches à risque de pollution... p.28
- 6B - Démarches participatives des citoyens et des acteurs impliqués
dans la gestion des sites pollués... p.30





1A. Nouvelles approches et outils de caractérisation in situ •

Présidence d'atelier : Hubert Léprond (EDF)
et Bénédicte Couffignal (Association RECORD)



Le constat

Le succès d'une opération de réhabilitation des sols et des eaux souterraines repose sur la **qualité, la fiabilité et la pertinence des mesures réalisées sur le terrain**, ainsi que sur une **analyse** et une **interprétation rigoureuse** des données pour éclairer les prises de décision.

Cette phase nécessite un grand nombre de données, à la fois rapidement mobilisables et suffisamment robustes pour sécuriser les choix, tant au stade du diagnostic (évaluation de la gravité de la situation) qu'au cours des travaux de réhabilitation (par ex. pour déterminer l'arrêt ou de la poursuite des interventions). L'enjeu de cet atelier est

donc de présenter les nouvelles approches et dispositifs de mesure et d'acquisition de données sur le terrain.

En lien avec les précédentes Rencontres Nationales de la Recherche sur les Sites et Sols Pollués organisées par l'ADEME et ses partenaires, une évolution significative des outils de caractérisation des pollutions *in situ* a été notée. Si aucune nouvelle présentation n'a porté sur les approches cartographiques (telles que le survol par drone), d'autres méthodes ont clairement franchi un cap, passant du stade conceptuel à une phase de développement opérationnel comme le phytoscreening et la dendrochimie. De nouveaux outils de mesures et d'analyses sur le terrain ont

également été introduits. Enfin, un autre point marquant de cet atelier réside dans la diversité des approches présentées, qui s'appliquent aussi bien aux pollutions d'origine minérale qu'à celles liées à des substances organiques.

Les acquis / les lacunes

Deux axes majeurs se dégagent des projets présentés :

1. L'approfondissement dans le développement de techniques. Un véritable franchissement de palier est observable entre les 4^e et 5^e RNR, notamment concernant les techniques de dendrochimie et de phytoscreening. Celles-ci sont désormais appliquées à un éventail élargi de familles de polluants tels que les composés organohalogénés volatils (COHV), les métaux, les hydrocarbures totaux pétroliers (TPH) et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Les travaux présentés proposent des comparaisons de méthodes et d'équipements d'analyse, qu'ils soient déployés sur le terrain ou en laboratoire, renforçant ainsi la robustesse et l'opérabilité de ces dispositifs.

2. L'essor de véritables laboratoires mobiles de mesures sur le terrain. Ces dispositifs permettent d'acquérir des données en temps réel, de croiser les méthodes de mesures (par ex. chimie couplée à l'imagerie hyperspectrale ou chimie et minéralogie). Ils s'appuient également sur l'intelligence artificielle pour faciliter et automatiser l'exploitation massive des données. Ce second axe, porté en grande partie par des startups, intervient ainsi non seulement sur la partie d'acquisition des données, mais aussi sur la partie aval de l'exploitation de données pour les restituer dans le laps de temps de l'intervention sur le terrain.

Le croisement des méthodes de caractérisation, à l'opposé d'une seule approche unique, constitue par ailleurs une garantie

supplémentaire pour sécuriser la prise de décision. Enfin, les outils cartographiques (notamment les approches par drone) n'ont pas fait l'objet de nouvelle présentation, ce qui pourrait signifier une maturité de ces techniques et un besoin de franchir un nouveau palier *via* le développement de dispositifs de mesure embarqués plus avancés.

« Présenter les nouvelles approches et dispositifs de mesure » »

En revanche, il est constaté que les problématiques « émergentes », telles que les microplastiques et les substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS), bien qu'elles suscitent un fort intérêt général et fassent l'objet d'un nombre important de publications scientifiques depuis plusieurs années, n'ont pas été abordées lors des présentations de cet atelier. Cette absence interroge, d'autant plus que la conférence invitée a souligné le cas préoccupant des plastiques, dont la production mondiale continue d'augmenter, entraînant une pollution diffuse et persistante. Certaines substances PFAS faisant déjà l'objet de restrictions réglementaires. Cette absence a vraisemblablement plusieurs origines, d'une part, les travaux de recherche sur ces pollutions sont encore en cours et un décalage persiste entre l'avancée des connaissances scientifiques et leur déclinaison en outils ou méthodes opérationnels ; d'autre part, ces sujets sont très sensibles pour de nombreux maîtres d'ouvrage ce qui peut freiner la communication publique et la diffusion des résultats.

Une autre voie d'intérêt qui n'a pas été explorée concerne des sujets historiques pour lesquels les besoins opérationnels demeurent importants.

1A. Nouvelles approches et outils de caractérisation in situ (suite)

Par exemple, l'identification et la détermination de la présence de fibres d'amiante.

Enfin, si les approches visant à installer un laboratoire sur le terrain constituent des innovations technologiques de rupture, leur pleine intégration dans les pratiques nécessite que leurs résultats soient jugés fiables et légitimes par l'ensemble des parties prenantes. Pour cela, il est essentiel que la robustesse et la reconnaissance des outils et des mesures produites soient équivalentes à celles des analyses au laboratoire. Le croisement des méthodes est de nature à renforcer cette confiance.

Les perspectives

Les perspectives de recherche identifiées lors de cet atelier se déclinent en 4 axes prioritaires :

1. Développer une approche intégrée de caractérisation du sol et de ses fonctionnalités en tenant compte de l'usage des sols.

Cette approche transverse vise à répondre à la notion de santé des sols telle que définie dans la future directive européenne sur la surveillance et la résilience des sols ;

2. Élaborer un plan d'action pour prioriser les recherches sur les substances émergentes,

en particulier les microplastiques et les PFAS, au regard de la diversité de ces composés et des problématiques associées. Cette démarche est rendue nécessaire pour optimiser les moyens, mais aussi pour donner de la visibilité aux différents acteurs impliqués ;

3. Encourager les projets de recherche axés sur l'acquisition de mesures *in situ* (sols / eaux souterraines).

Ce champ de recherche reste peu exploré en France en comparaison avec d'autres pays. Il concerne à la fois les substances émergentes et des substances bien identifiées telles que les composés COV, les HAP, l'amiante, etc.



B. Couffignal et H. Léprond

4. Poursuivre les travaux de croisement des approches

(chimie / minéralogie - chimie / imagerie), mais aussi sur la phase aval, entre la mesure et l'exploitation des données. L'intégration croissante de l'intelligence artificielle dans le traitement de données ouvre de nouvelles perspectives prometteuses. Ces approches étant très novatrices, il est nécessaire de travailler sur la pédagogie et la légitimité des résultats pour en faciliter l'appropriation par les parties prenantes (notamment l'administration).

Enfin, au-delà des seuls aspects purement technique ou scientifique, il demeure essentiel de consolider les retours d'expérience des projets de recherche sur les volets économique et calendaire, afin de favoriser l'appropriation et l'utilisation des nouveaux outils par l'ensemble des acteurs du domaine.

 **Travailler sur la pédagogie et la légitimité des résultats pour faciliter l'appropriation [des] nouvelles approches.** 

1B. Outils de traitement et de cartographie des données •

Présidence d'atelier : Sébastien Kaskassian (TAUW)
et Jean-Yves Richard (SARPI / VEOLIA)



Le constat

Les études ont présenté l'utilisation de méthodes d'interprétation et de modélisation des données collectées sur des sites et territoires à différentes échelles (métropoles, quartiers, grandes friches polluées), et ce afin de répondre à différents besoins :

- **Créer des cartes d'anomalies** à l'échelle de la France hexagonale en appui à la valorisation des terres excavées,
- **Définir les fonds (pédo)-géochimiques** à l'échelle de métropoles, afin de mieux caractériser l'état des milieux,
- **Spatialiser les risques sanitaires** à l'échelle d'un site pour adapter le projet d'aménagement à la présence de pollutions,
- **Déterminer l'origine des pollutions** présentes sur un territoire grâce à des méthodes de forensie combinées à des analyses statistiques.

Ces travaux, basés sur des méthodes statistiques, géostatistiques, isotopiques et sanitaires, permettent de développer des méthodologies pour traiter de grands jeux de données multivariées. Ils couvrent en particulier la validation de la qualité des données en fonction des objectifs (homogénéisation des bases, traitement des valeurs aberrantes et des limites de quantifications), le regroupement et la classification des données selon différents critères (p. ex., par type de lithologie ou d'activité industrielle), ainsi que les règles de calcul et de classement des mailles modélisées, etc. Ces travaux démontrent l'applicabilité des outils existants dans divers contextes et pour répondre à des objectifs variés ; en cela ils constituent une avancée notable par rapport à l'état des lieux des précédentes Rencontres de 2019.

Les acquis / les lacunes

Les démarches de traitement des données et de leur modélisation sont des avancées qu'il convient de rendre accessibles au travers de guides, de rapports et d'outils de visualisation partagés, afin que la communauté des acteurs de la gestion des sites pollués ou des terres excavées puisse s'en emparer. Bien que certains outils soient déjà publiés (comme la méthodologie de valorisation des terres excavées, ou les données issues du fond géochimique urbain), leur appropriation reste encore limitée et diffuse lentement. Il sera intéressant à l'avenir de suivre l'évolution de l'utilisation de ces démarches et de leur contexte d'application. Par ailleurs, des questions se posent déjà concernant l'utilisation de ces informations par le grand public.

Concernant les études visant à définir les fonds géochimiques ou les anomalies sur de vastes territoires, les différents travaux mettent en avant le besoin d'aboutir à plus de consensus concernant les méthodologies d'interprétation et de modélisation, afin de rendre les approches interoperables et automatisables : règles de « nettoyage » des bases, de gestion des données inférieures aux limites de quantification, hypothèses statistiques à tester, etc.

Conjointement, il apparaît également nécessaire de croiser les données issues de différentes sources (BDSolU, Donesol, données du GIS Sol et celles acquises à l'échelle de métropoles et communes, etc.) pour enrichir et consolider les cartographies et seuils définis.

Les approches de spatialisation des risques sanitaires ou de définition de l'origine d'une pollution sont des exemples probants de croisement d'outils de géostatistique, de modèles de transfert et de forensie. Ces applications sont très spécifiques et leur mise en œuvre nécessite encore à ce jour de forts investissements, d'une part en données et d'autre part en ingénierie.

Les perspectives

Pour les études portant sur la définition des fonds géochimiques ou des anomalies à l'échelle de larges territoires, les défis à relever sont de plusieurs ordres :

- **Enrichir les jeux de données**, en combinant les bases de données existantes avec de nouvelles campagnes d'acquisition, afin de mieux mailler le territoire, notamment dans les zones en périphérie des métropoles,
- **Inclure de nouveaux paramètres** comme ceux décrivant les sols (pH, argile, MO, éléments lixiviables, etc.), les polluants diffus (pesticides, microplastiques, PFAS, etc.) ou des indicateurs de la santé des sols (Directive Européenne sur la surveillance des sols),
- **Promouvoir les outils développés et les retours d'expérience** issus de leur mise en application dans différents contextes (gestion de pollution vs. valorisation des terres) et par différents acteurs (services fonciers des métropoles, bureaux d'études, entreprise de travaux, acteurs du recyclage des matériaux, etc.),
- **Faire évoluer la méthodologie de valorisation des terres provenant de sites et sols pollués** dans les projets d'aménagement, en la couplant aux seuils pédogéochimiques afin de la rendre plus opérationnelle. En effet, les retours d'expérience accumulés au fil des années montrent que l'utilisation des valeurs de fond géochimiques comme simples valeurs seuils ne permet pas de valoriser les terres non polluées excavées en milieu urbain.

2A. Transferts gaz du sol/air intérieur et mesures constructives •

Présidence d'atelier : Olivier Atteia (UMR EPOC/Innovasol)
et Jean-Marie Come (BURGEAP/UPDS)



Le constat

Suite aux contaminations des sols par des composés volatils (hydrocarbures, solvants, etc.), la qualité de l'air dans les bâtiments est une problématique de grande actualité, une large part des risques sanitaires induits par ces sites étant liée à la qualité de l'air intérieur.

L'exposé du Grand Lyon comme conférence invitée a mis en évidence la problématique pour un gestionnaire d'espaces fonciers qui veut favoriser le ré-usage de sites pollués avec des bâtiments : la prise en compte de la contamination des sols est primordiale et peut conduire à la mise en place de mesures constructives. Les vides sanitaires étant interdits dans les servitudes d'utilité publique liées à la

parcelle à aménager, et leur modification étant jugée trop complexe, le Grand Lyon a souhaité mettre en œuvre un SDS (Système de Dépressurisation des Sols) dans le cadre du projet de construction. Il apparaît que le dimensionnement de ces mesures est complexe en relation avec la caractérisation de l'état réel de contamination du milieu, ainsi que l'efficacité des éléments constructifs (drains...).

Cet atelier était ainsi centré sur cette double question : **comment mieux caractériser le milieu gaz du sol et air intérieur et comment dimensionner un SDS ?**

Les acquis / les lacunes

Plusieurs développements méthodologiques ont eu lieu dans le cadre de projets

GESIPOL et AQACIA, avec des livrables de type guides techniques et publications scientifiques. Une des évolutions importantes de ces dernières années consiste à la mise en place **d'expérimentations** en vraie grandeur sur des sites contaminés.

En ce qui concerne les mesures constructives, en complément des travaux de recherche précédents (EvalSDS) et de l'exemple du Grand Lyon, le projet BARIAIR a été présenté. Reposant sur une plateforme expérimentale dédiée, ce projet a montré la possibilité de recourir à une approche simplifiée de dimensionnement d'un SDS (solution analytique développée) prenant en compte les différents éléments du réseau de drainage des gaz du sol, intégrant les pertes de charge. Cela pour différentes conceptions du réseau. Cette approche donne des résultats similaires à ceux d'un modèle numérique (CFD) permettant ainsi un usage facilité. En ce qui concerne la métrologie, les mesures dans l'air du sol étant influencées par les fortes hétérogénéités spatio-temporelles dans le milieu, les mesures effectuées dans le cadre du projet DEMAQAI montrent qu'il est préférable d'utiliser des mesures de flux de surface (ici avec une chambre à flux de dimension métrique) pour obtenir des prédictions réalistes des risques de remontées de vapeurs dans les futurs bâtiments. Au-delà des progrès dans le domaine de la modélisation des transferts, les différents travaux menés soulignent par ailleurs l'importance de la donnée de perméabilité à l'air des sols, qui va grandement influencer les flux d'air du sol vers le bâtiment. Des méthodes de mesures en surface sont proposées pour estimer ce paramètre.

Afin de prendre en compte la variabilité temporelle des mesures dans les gaz des sols et l'air intérieur, provenant notamment des échanges entre le bâtiment et l'air extérieur, une méthode de prélèvement de longue durée a été développée et testée sur 2 sites réels (pollution HC C6-C10 et COHV) dans le cadre du projet CARACTAIR. Les

mesures effectuées à l'aide de pompes de faibles débits et avec différents types d'adsorbants spécifiques sur des échelles de temps différentes montrent une bonne cohérence des résultats avec un suivi en continu par GC portable. La méthode d'échantillonnage et d'analyse développée est considérée comme robuste pour l'intégration temporelle des concentrations sur plus de 21 jours pour les solvants chlorés (hors chlorure de vinyle) et les hydrocarbures dans les gaz du sol et l'air intérieur.

Dans le cadre du projet CARACTAIR, des travaux expérimentaux confrontés à de la modélisation analytique (avec développement d'un nouveau modèle) et numérique ont été menés pour prendre en compte la biodégradation aérobie de composés organiques (en l'occurrence des BTEX) dans les transferts gazeux dans la ZNS. Les travaux menés mettent en évidence le rôle majeur de la biodégradation dans l'atténuation des concentrations gazeuses dans la ZNS, lié à la pénétration de l'oxygène dans le sol, qui dépend à la fois du sol, mais aussi des conditions aux limites du système (profondeur de la source, couverture...). En raison de la variabilité des constantes de biodégradation, des mesures sont recommandées pour quantifier le phénomène (profil d'oxygène souterrain ou flux de CO₂ en surface...).

Les perspectives

En synthèse, les résultats clés de cet atelier concernent d'une part une meilleure caractérisation des concentrations dans les gaz des sols et l'air intérieur ainsi que des flux gazeux des sols vers l'air intérieur, et d'autre part des méthodes et outils de dimensionnement d'un SDS. Les actions prioritaires de R&D à mener sont la capitalisation de la mise en œuvre de ces méthodes et outils en conditions réelles.

2B. Transfert des pollutions dans les sols ●

Présidence d'atelier : Pauline Rousseau Gueutin (EHESP) et Béatrice Bechet (Univ Eiffel, campus de Nantes/IFSTTAR/IRSTV/Allenvi)



Le constat

Complémentaire de l'atelier sur les transferts des gaz du sol à l'air intérieur, cet atelier a porté sur les **transferts de polluants dans les sols en zone saturée et non saturée**. Plus spécifiquement, les présentations ont concerné le devenir de polluants des échelles labo au terrain, dans des contextes variés : gestion des eaux pluviales et de sédiments de dragage, compréhension des écoulements triphasés de LNAPL, dimensionnement d'un traitement tenant compte de l'atténuation de la source. La session a permis, au regard des perspectives énoncées lors des journées précédentes, de faire le constat d'un certain nombre d'avancées. Les études se sont attachées à considérer des systèmes complexes (matrice, eau porale, polluant),

au plus proche de la réalité de terrain, attachés à des problématiques concrètes répondant à des enjeux de gestion des eaux pluviales, de désimperméabilisation des sols, de recyclage de matériaux et de gestion de sites pollués.

Les acquis / les lacunes

Les approches combinées « **expérimentation-modélisation** », présentes dans chacune des études, ont vocation à aider à la compréhension des processus réactionnels en milieu variablement saturé, mais aussi à les hiérarchiser dans les modèles opérationnels. Un exemple d'utilisation de la modélisation pour estimer la durée d'atténuation d'une source a été montré, cela figurait aussi parmi les attendus pour améliorer les scénarios de dépollution

de site. Les travaux présentés ont mis en exergue, dans la continuité des journées antérieures, la maturité des modèles disponibles en recherche d'un point de vue des fonctionnalités pour simuler les processus de transfert d'eau et de polluants en multi-échelle/multiphasique/multicomposants.

Ainsi, en appui aux politiques publiques d'infiltration des eaux pluviales, l'efficacité des nœuds pour le traitement de la charge polluante des eaux, dans un contexte de pollution de sol résiduelle est questionnée. Une expérimentation terrain souligne la nécessité d'inscrire le suivi dans la durée et dans une réflexion globale sur la réactivité de la matrice et la spéciation de divers polluants dans les eaux. Les hypothèses sur la spéciation des métaux dans des sédiments de dragage fondent l'approche géochimique de simulation de leur mobilité, dans la deuxième intervention.

L'objectif est d'aller vers une **meilleure anticipation de l'évolution des matériaux** à terre et se base sur une nouvelle méthodologie croisant tests d'altération contrôlée et modélisation géochimique. Le résultat obtenu est encourageant puisqu'une certaine homogénéité de comportement est mise en évidence. Le pilote 3D développé pour étudier la migration de LNAPL dans une situation de pompage, explore l'influence des variations de saturation en eau, induisant des configurations d'interface LNAPL-eau complexes. Le modèle développé n'échappe pas au besoin d'alimentation par des paramètres nombreux et spécifiques au milieu et au polluant.

Enfin, c'est également l'usage de la modélisation qui permet de répondre à une question de choix et d'optimisation d'un procédé de traitement, dans un contexte réel de contamination forte d'un site par des NAPL et par une approche coûts/bénéfices.

Cependant, les présentations faites sont toutes reliées à des configurations particulières. Le travail réalisé sur les sédiments

de dragage vise clairement à définir une expérimentation et une modélisation générique associées, et atteint partiellement son objectif de définition d'un comportement général des polluants. Cette intention paraît difficile à mettre en œuvre pour les autres configurations. La compréhension des processus de transport et l'optimisation de traitement *in situ* restent spécifiques aux conditions de site, mais l'acquisition de données terrain mise en œuvre conforte plus systématiquement les hypothèses mécanistiques. La question de la qualité de la mesure et de la maintenance des capteurs déployés *in situ* et sur les pilotes n'a pas été abordée, ni la possibilité/ les moyens nécessaires pour maintenir des suivis sur la durée pouvant faire passer les sites au stade de démonstrateurs. Un regard critique dans cette direction serait favorable à la validation des données.

La description partielle des processus géochimiques en zone non saturée est également une contrainte forte à l'intégration de la complexité dans des modèles opérationnels. L'intégration de la composante biologique dans les systèmes réactionnels reste le parent pauvre, mais les études proposées dans la session ne s'y prêtaient pas forcément.



P. Rousseau Gueutin et B. Bechet



Les perspectives

Le contexte de la prise en compte des impacts du changement climatique dans la gestion prospective des sites a été abordé au travers de la présentation sur l'atténuation d'une source de pollution. Il apparaît nécessaire de prêter une attention nouvelle, en termes de mobilisation de polluants, aux configurations de variation de niveau de nappe et d'état de saturation des sols.

De ce fait, certaines réactions géochimiques, telles que les réactions redox pourraient prendre plus d'importance. Les travaux réalisés sur les sédiments en contact avec l'atmosphère après confinement marin pourraient être pris en considération dans cet autre contexte. L'influence forte des incertitudes sur les données pluviométriques et géochimiques sur la modélisation des transferts a été pointée. Le lien avec les diffé-

rents travaux soutenus par l'ADEME sur le sujet des incertitudes, et partiellement présentés dans ces journées, fait donc tout à fait sens et ces derniers gagneraient à être largement appropriés.

Parmi les autres perspectives, on peut noter le besoin de poursuivre les approches combinées « terrain – pilote/laboratoire », qui, si elles nécessitent beaucoup de moyens, sont nécessaires pour « déconvoluer » la complexité. La problématique du transfert colloïdal des polluants listé dans les perspectives précédentes n'a pas été traitée dans les présentations de la session, mais l'a été, au moins dans une présentation dans la session « PFAS ». C'est une composante du transfert de polluants mise en évidence également en gestion des eaux pluviales, et en particulier pour les polluants organiques.

Des données de quantification de cette composante (diagnostic) sont encore nécessaires dans de nombreux contextes.

 **Les approches combinées expérimentation-modélisation ont vocation à aider à la compréhension des processus réactionnels.** 



3A. Approches intégrées de l'évaluation des risques environnementaux •

Présidence d'atelier : Nathalie Velly (INERIS) et Annette Devaufleury (Univ Franche-Comté)



Le constat

Les présentations de l'atelier ont mis en lumière les avancées significatives dans le développement de **méthodes opérationnelles d'évaluation des risques environnementaux (ERE)** pour les écosystèmes, en particulier à travers la démarche **TRIADE** appliquée à la gestion des sites et sols pollués.

Cette méthode, normée (ISO 19204-2017), fait référence à trois approches méthodologiques différentes et complémentaires : les approches chimique, écotoxicologique et écologique. L'approche chimique évalue le risque sur la base des substances identifiées sur un site, l'approche écotoxicolo-

gique évalue le risque en caractérisant la relation dose/effet de différentes matrices environnementales (sols, eaux superficielles, effluents...) lors d'essais d'écotoxicité de laboratoire et l'approche écologique évalue le risque en étudiant la variation de la biodiversité et de la qualité écologique des milieux. Elle complète l'évaluation des risques pour la santé humaine (ERS) et s'inscrit dans le cadre du concept « One Health », qui lie la santé humaine, environnementale et animale.

La démarche TRIADE peut être déployée suivant 3 niveaux de complexité croissante. Les conditions d'application de la TRIADE ont été présentées sur des sites à enjeux environnementaux présents ou futurs.

Plusieurs des priorités listées suite aux 4^e rencontres SSP ont été mises en œuvre, notamment la nécessité de retours d'expérience sur des sites pollués.

Les acquis / les lacunes

L'opérationnalisation de la démarche a été illustrée via des études de cas réunissant bureaux d'études et acteurs institutionnels, dans le cadre du projet **TRIPODE** ayant abouti à l'élaboration d'un guide technique. Ce guide propose une méthodologie adaptable, rapide à mettre en œuvre et accessible, destinée aux professionnels de la gestion des sites et sols pollués.

Le choix des indicateurs proposés pour mener à bien l'étude avec des complexités croissantes (niveau 1 de type screening jusqu'au niveau 3 pour une étude plus approfondie) a été discuté. Actuellement, il reste ouvert selon le dimensionnement de l'étude à savoir ses objectifs, les moyens humains et financiers alloués et son calendrier.

Parmi les outils émergents, le développement d'indicateurs d'impacts basés sur des modifications taxonomiques et fonctionnelles (chez des bactéries et invertébrés) montre un fort potentiel pour affiner le diagnostic écologique des sols pollués.

L'approche complémentaire **TRIADE Diva** propose d'intégrer, dans la caractérisation de la pollution des sols des indicateurs pédo-agronomiques, ce qui fait écho à la notion de santé des sols pour évaluer à la fois le risque écologique et l'amélioration du fonctionnement du sol au cours d'une opération de réhabilitation écologique.

Pour évaluer l'impact des pollutions sur les écosystèmes terrestres, la TRIADE Diva utilise un site de référence local (témoin) permettant de comparer l'état de santé du sol — à l'aide d'un indice global — à cet état de référence ainsi qu'à un état

dégradé (état initial avant réhabilitation). Ce choix doit être discuté au cas par cas, et des retours d'expérience sont encore nécessaires avant de pouvoir généraliser cette approche.

Les principales limites identifiées concernent l'approche écologique dans l'ERE. Celles-ci tiennent notamment à la difficulté d'interprétation des données — pour distinguer les effets spécifiques de la pollution de ceux liés aux caractéristiques naturelles des sols — et au nombre restreint d'indicateurs disponibles. L'importance du référentiel de comparaison a été soulignée, tout comme l'utilisation encore marginale de l'approche écotoxicologique dans le cadre de l'ERE.

Les perspectives

L'atelier a souligné la nécessité de développer des outils et méthodes adaptés aux spécificités de chaque site. Cela implique d'élargir les valeurs de référence pour les indicateurs écotoxicologiques et écologiques, en tenant compte des conditions pédoclimatiques. Intégrer les caractéristiques agro-pédologiques du sol permettrait de mieux distinguer les impacts liés à la pollution du sol de ceux liés aux propriétés intrinsèques du sol.



A. Devaufleury et N. Velly



Il apparaît pertinent de poursuivre le retour d'expérience de l'application de la démarche TRIADE et le développement de nouveaux outils pour évaluer la probabilité d'impact significatif de la pollution des sols sur la diversité et les traits fonctionnels des communautés biologiques du sol.

La révision en cours de la norme TRIADE permettra d'intégrer ces retours d'expérience, améliorant ainsi l'opérationnalité de cette méthode, afin qu'elle aboutisse à un outil d'aide à la décision notamment pour les zones d'intérêt écologique et les changements d'usage de type renaturation pour des friches ou sites à passif environnemental.

Ces approches permettront d'évaluer à la fois le risque écologique et les fonctions du sol, afin de démontrer l'efficacité des Solutions fondées sur la Nature (SfN) via une évaluation bénéfice/risque, en complément du bilan coût/avantage proposé par la méthodologie SSP.

De façon plus large, les travaux de recherche devront viser une meilleure co-

hérence entre les outils d'évaluation des risques environnementaux et ceux de l'évaluation de la santé des sols, en lien avec les enjeux des zones à intérêt écologique.

Enfin, ces travaux nécessitent de continuer la recherche en écotoxicologie pour élargir les connaissances sur l'écotoxicité de polluants tels que les PFAS par exemple.

En lien avec l'évaluation de la biodisponibilité/bioaccessibilité orale (atelier 3C) et le concept de One Health, l'approche chimique de la TRIADE nécessite d'être appliquée à un large panel de substances chimiques.

Néanmoins, au vu de la grande diversité des contaminants, la question des substances et la prise en compte des effets cocktails restent des sujets d'intérêt pour cet atelier ainsi que pour les ateliers 3B (Nouvelles approches méthodologiques pour l'évaluation de la toxicité et écotoxicité des polluants) et 3C (Outils d'évaluation de l'exposition et des impacts sur le vivant), nécessitant une priorisation préalable.

« Ces travaux nécessitent de continuer la recherche en écotoxicologie pour élargir les connaissances sur l'écotoxicité de polluants. »

3B. Nouvelles approches méthodologiques pour l'évaluation de la toxicité et ecotoxicité des polluants •

Présidence d'atelier : Frédéric Gimbert (Chrono-environnement)
et Jean-Marie Come (Burgeap/UPDS)



Le constat

Nous sommes aujourd'hui entrés dans une nouvelle ère, celle de l'**Anthropocène**, marquée par l'impact de l'Homme sur le fonctionnement du système planétaire, notamment *via* l'émission, dans tous les compartiments de la biosphère (atmosphère, sols, eaux), de substances contaminantes et/ou polluantes.

Par exemple, il existe plus de 8 000 000 de produits chimiques commercialisés, mais nous ne disposons de données écotoxicologiques que pour moins de 100 000 d'entre eux.

Ainsi, les questions relatives à l'évaluation de l'exposition des organismes, à la quantification des impacts et au développement d'outils de gestion des risques environnementaux et sanitaires sont plus que jamais d'actualité. C'est pourquoi cet atelier avait notamment pour objectif de mettre en avant les approches méthodologiques, qu'elles soient traditionnelles ou plus novatrices, utilisables pour l'évaluation de la toxicité et écotoxicité des polluants présents dans l'environnement et en particulier les sols.

Dans ce contexte, cet atelier s'est principalement focalisé sur deux problématiques :

les **multi-contaminations** (effet cocktail) et l'**identification des modes d'action toxiques**. Différentes familles de polluants ont ainsi été mises en avant, regroupant à fois des substances classiquement retrouvées en sites et sols pollués (SSP) comme les métaux et les HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) et d'autres dites émergentes comme les CAP-O (Composés Aromatiques Polycycliques Oxygénés) ainsi que les per- et polyfluoroalkylés (plus connus sous le nom de PFAS).

Les acquis / les lacunes

Les travaux, basés sur des études *in vitro* (sur des lignées cellulaires humaines), *in vivo* (bioessais sur différents modèles biologiques comme des algues, rotifères, vers de terre et embryons de poisson) et des approches de modélisation (par ex. QSARs, AOP), ont pu préciser et caractériser les sources de contamination et les effets de ces polluants dans des scénarios d'exposition prenant en compte leur co-occurrence.

En considérant des paramètres biologiques originaux (génétoxicité, neurotoxicité) et en adoptant une méthodologie de caractérisation des effets à différents niveaux d'organisation biologique (par ex. *via* des formalismes de type Adverse Outcome Pathways ou chemin de l'effet néfaste), les études présentées ont permis de montrer que des polluants différents (par ex. un métal et un HAP) pouvaient initier des événements moléculaires différents, mais néanmoins conduire à des effets apicaux similaires.

Ces résultats sont d'autant plus importants que la réalité de l'exposition aux polluants retrouvés dans les SSP est une exposition à des mélanges (cocktails) plutôt qu'à des composés individuels.

Enfin, au regard des cibles potentielles, l'exposition aux SSP soulève des enjeux à

la fois en évaluation des risques environnementaux (ERE), mais aussi sanitaires (ERS), approches qui, comme l'ont démontré plusieurs présentations de cet atelier, pourraient être couplées *via* la mise en œuvre d'outils et méthodologies globaux.

Si les approches traditionnelles ont apporté des informations essentielles pour développer les procédures d'évaluation des risques et l'établissement de normes environnementales, elles s'avèrent aujourd'hui limitées en particulier parce qu'elles concernent des polluants considérés individuellement, au cours d'expositions souvent aiguës, en suivant des paramètres biologiques drastiques (par ex. la mortalité) et en assumant une relation dose-réponse monotone.

Mais aujourd'hui, la concomitance de multiples substances chimiques libérées dans l'environnement nécessite de développer de nouveaux concepts et outils en considérant **des scénarios d'exposition plus réalistes** incluant des mélanges de contaminants, notamment émergents (micro et nanoparticules, notamment plastiques, perturbateurs endocriniens, PFAS...), dans des gammes de concentrations environnementalement pertinentes, pour des durées d'exposition longues (par ex. à l'échelle du cycle de vie, en lien avec la notion d'exposome), en suivant des paramètres biologiques sub-létaux à différentes échelles d'organisation biologique (gènes, croissance, reproduction) et en considérant des modèles dose-réponse non monotones. Les interactions (additivité, synergisme, antagonisme...) entre les contaminants coexistant en SSP restent difficiles à caractériser, car les réponses ne sont pas homogènes selon le niveau d'organisation biologique considéré en lien avec la multiplicité des mécanismes d'action toxique à l'origine des effets observés.



JM. Come et F. Gimbert

En ce sens, continuer à collecter des données de chimie environnementale, de toxicologie et d'écotoxicologie s'avère nécessaire. Néanmoins, des corpus de données contenant un grand nombre d'informations sont probablement déjà disponibles (en particulier pour des contaminants historiques comme les métaux ou les HAP), mais ils restent insuffisamment exploités du fait de limitations (capitalisation, incertitudes...) dans leur interopérabilité.

Les perspectives

Publiée en 2023, la proposition de directive sur les sols (directive du Parlement européen et du Conseil relative à la surveillance et à la résilience des sols) relance la mise en place d'un cadre européen pour maîtriser la dégradation de la qualité des sols.

Pour continuer à avancer et conduire des politiques pertinentes de recherche et de protection de l'environnement et des populations, il conviendrait de renforcer les liens entre l'exposition externe, à l'échelle du cycle de vie des organismes et à des mélanges de polluants, et les concentrations internes de ces substances au niveau des sites d'action engendrant les effets toxiques. Ce que l'on nomme aujourd'hui le concept d'éco-exposome.

Cette orientation intégrée multi-échelles et multi-expositions nécessite une combinaison d'actions dont certaines sont proposées ci-après :

- **Renforcer les dispositifs de surveillance de la contamination des milieux**, notamment pour les contaminants émergents, en s'appuyant sur des observatoires de suivi à long terme (comme par exemple le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols, RMQS),
- **Étudier de façon plus systématique des familles de polluants** vs un nombre limité de composés dans une famille (PFAS, HC, HAP, CAP-O...)
- **Produire des valeurs guides environnementales** (VGE), provisoires et révisables, en les associant, pour mieux les interpréter, avec des valeurs toxicologiques de référence interne (VTRI),
- **Continuer à décroiser et réconcilier les aspects sanitaires et écologiques** pour obtenir une réponse globale (en termes de potentialités des sols, des sites, des risques...), notamment en mobilisant d'autres communautés de chercheurs en santé humaine (INSERM...), santé animale (ANSES...) et santé végétale (CIRAD...)
- **Utiliser plus couramment des méthodes innovantes** (dont l'AOP) et en développer d'autres, notamment fondées sur des techniques d'IA.
- **Élargir le recours aux démarches de modélisation** pour anticiper les risques et servir d'outil d'aide à la décision pour la gestion des SSP,
- **Développer des outils de communication** pour un meilleur partage des enjeux des SSP entre les différentes parties prenantes (chercheurs, acteurs socio-économiques, gestionnaires et politiques publiques).

Il existe plus de 8 000 000 de produits chimiques commercialisés, mais nous ne disposons de données écotoxicologiques que pour moins de 100 000 d'entre eux.

3C. Outils d'évaluation de l'exposition et des impacts sur le vivant •

Présidence d'atelier : Annette Devaufleury (Univ Franche-Comté) et Nathalie Velly (INERIS)



Le constat

Pour l'analyse de l'exposition et des impacts des polluants sur les organismes, il est important de distinguer la fraction **biodisponible**, à savoir la fraction de contaminant ayant passé les barrières biologiques (dose absorbée), de la fraction **bioaccessible** (fraction libérée par les sucs gastro-intestinaux et donc disponible pour l'absorption).

Les travaux menés sur l'évaluation de la bioaccessibilité orale estimée au moyen du test normalisé UBM (ISO 17924:2019) pour l'arsenic, le cadmium et le plomb et appliquée en tant que facteur correctif de la concentration totale ont permis une

estimation plus réaliste de l'exposition et ainsi d'améliorer la pertinence de l'évaluation des risques sanitaires.

Le test HCl en cours de normalisation est aujourd'hui de plus en plus utilisé comme première évaluation de la bioaccessibilité gastrique.

Les acquis / les lacunes

La mesure de la bioaccessibilité de l'arsenic dans les sols constitue une recommandation de la Haute Autorité de Santé pour une évaluation pertinente des expositions et des risques quand la concentration d'arsenic inorganique dans les sols est éle-

vée (supérieure à 25 mg/kg MS). En effet, la bioaccessibilité de l'arsenic des sols est très variable, en fonction des espèces de l'arsenic impliquées et de la composition des sols.

De nouveaux travaux visent à étendre le panel de substances disposant de tests de mesure de la bioaccessibilité orale validés.

Des travaux sont ainsi en cours pour valider le test UBM avec d'autres éléments traces métalliques d'intérêt tels que le nickel et le chrome. D'autres concernent l'évaluation de la bioaccessibilité orale de polluants organiques persistants (4 PCB-ndl) *via* un test *in vitro*. Ce test révèle des comportements qui peuvent varier selon les molécules considérées (degré de chloration) ou la teneur en matière organique des sols.

L'atelier a aussi permis de présenter des travaux concernant **la cartographie des concentrations totales de métaux** dans les sols et des concentrations disponibles et phytodisponibles comme outil d'aide à la décision pour la gestion des sites pollués. Une divergence entre les résultats obtenus a soulevé la question de l'utilisation des fonds géochimiques locaux.

Une mise en perspective des effets du jardinage sur la santé a permis d'analyser les risques et les bénéfices du jardinage sur un sol pollué.

On constate, parmi les lacunes identifiées, qu'il existe encore une gamme limitée de polluants pour lesquels les méthodes d'évaluation de la bioaccessibilité (test UBM, test simplifié à l'HCl) sont applicables et validées : à savoir As, Pb, Cd. Par ailleurs, peu d'études associent la mesure de teneurs totales, disponibilité environnementale, phytodisponibilité avec la mesure de la bioaccessibilité orale.

Il serait par ailleurs intéressant que les travaux d'exposition humaine intégrant la bioaccessibilité soient menés jusqu'à

l'évaluation de l'impact sanitaire des polluants sur la population.

Les perspectives

En termes de perspectives pour les travaux à venir, il serait opportun de comparer les anomalies déterminées entre les mesures de fractions disponibles (disponibilité environnementale et phytodisponibilité) avec la mesure de bioaccessibilité orale pour confirmer ou infirmer la mobilité des fractions disponibles comme première approche dans l'évaluation de l'exposition vers l'Homme.

Il apparaît nécessaire de continuer les recherches pour valider le test UBM modifié ou non sur davantage de polluants d'intérêt. Pour **l'évaluation de la bioaccessibilité orale**, il s'agira de poursuivre la validation des tests de manière *in vitro* ou *in vivo*. Parallèlement, pour l'évaluation de la bioaccessibilité orale des polluants organiques, il s'agira de tester une large gamme de sols ainsi que diverses résines pour le test *in vitro*. Au regard des discussions lors de l'atelier, l'impact sur le biote intestinal des polluants associés aux sols ingérés qui ne sont pas absorbés (et donc écartés de l'évaluation des risques) pourrait mériter des travaux spécifiques.

Les nouvelles approches méthodologiques (notamment les modèles toxicocinétiques, Adverse Outcome Pathway et modélisation QSAR) en évaluation des risques pour la santé humaine associés aux substances chimiques ouvrent la voie à de nouvelles pistes de recherche pour relier l'exposition humaine aux impacts sanitaires attendus dans le contexte de la gestion des sites pollués. Parmi les projets évoqués, figure la démarche d'analyse des risques et bénéfices pour des usages récréatifs tels que le **jardinage**.



A. Devaufleury, N. Velly, V. Bert et N. Pucheux

« Il apparaît nécessaire de continuer les recherches pour valider le test UBM modifié ou non sur davantage de polluants d'intérêt. »

Il sera intéressant de prendre en compte les résultats et les recommandations qui pourront en découler, en vue de réfléchir à la pertinence de prolonger ce type d'approches à d'autres contextes.

Dans le cadre de l'évaluation de l'impact de polluants sur les écosystèmes terrestres, des travaux pourront être menés pour confirmer la pertinence de l'étude :

- **des différents maillons trophiques** et en particulier les premiers niveaux à l'échelle des communautés microbiennes utiles pour la fourniture de services écosystémiques essentiels au sol et
- **des démarches multi-échelles** (échelles moléculaires, cellulaires et des communautés).

Néanmoins, avant d'extrapoler et de généraliser les conclusions, il apparaît pertinent de prévoir un retour d'expérience sur des sites présentant des conditions variées (degré de pollution, paramètres physico-chimiques du sol, usages du site voire temps écoulé depuis la réhabilitation écologique).

4A. Repousser les limites des traitements biologiques •

Présidence d'atelier : Laurent Thannberger (Valgo/UPDS)
et Jean-Yves Richard (SARPI/VEOLIA)



Le constat

Plus ancienne technique de dépollution, fondée sur l'exploitation du potentiel épuratoire naturel du sol, la **dépollution biologique** est largement utilisée depuis de nombreuses années, dans de nombreux contextes. Elle représentait, dans les années 2010, environ le tiers des opérations de traitement. En dépit de la complexification des opérations de traitement et du développement d'autres techniques, elle reste abondamment appliquée, même si elle bute régulièrement sur plusieurs limites.

La conférence introductive a fait l'état de l'évolution des connaissances et des applications au cours de ces dernières années. Mieux comprendre permet parfois d'expliquer une problématique, pas toujours de la résoudre. Les principales limites du traitement

biologique sont la grande stabilité de certains polluants, souvent appelés récalcitrants et la faible biodisponibilité des polluants à dégrader entraînant une durée de traitement souvent longue et soumise à aléas (dépendant de la lithologie, des conditions climatiques et environnementales...). La réalisation d'essais poussés en phase conception pourrait permettre de réduire ces incertitudes (analyse isotopique, quantification de biomarqueurs, essais de respirométrie, etc.).

Les acquis / les lacunes

Les difficultés à traiter une pollution par voie biologique peuvent être dues à une grande **stabilité et/ou concentration en polluant**. Dans ce cas, les synergies avec d'autres techniques de dépollution

peuvent être étudiées. En particulier, les techniques d'oxydation chimique *in situ*, en s'attaquant à la pollution concentrée et en la préoxydant, créent également des conditions favorables à la biodégradation, à la périphérie de leur zone d'influence. Dans cet esprit, Semaco a présenté une technique d'oxydation avancée, l'électro-Fenton.

Les difficultés à optimiser un traitement biologique sont parfois liées à un **manque d'outil de monitoring performant**. Ainsi, le projet **Sobiove**, présenté par Ginger-Burgeap, a développé une méthodologie permettant de suivre spécifiquement l'activité biologique et a démontré la part prépondérante de la biodégradation par rapport à la volatilisation, lors des traitements par venting/bioventing. Les conclusions du projet préconisent de pratiquer des analyses en continu et une quantification isotopique du carbone.

Une des principales limites des traitements biologiques de sol est la faible bioaccessibilité du polluant. La biodégradation ralentit puis s'arrête quand le polluant résiduel n'est plus accessible aux microorganismes épurateurs. Ainsi, l'utilisation de surfactants, favorisant l'accessibilité aux polluants, peut permettre d'accélérer le traitement et/ou d'atteindre des teneurs résiduelles plus faibles. C'est l'approche utilisée au cours du projet **BIO&BIO** présenté lors de l'atelier. L'injection *in situ* de biosurfactants de type rhamnolipides a permis de désorber les hydrocarbures et d'accélérer leur biodégradation.

Les traitements biologiques peuvent aussi être une solution pour la **gestion complexe des stériles miniers**. Sur le site de Carnoules, le BRGM a démontré la faisabilité, à l'échelle pilote, de neutraliser et de traiter les métaux des drainages miniers acides grâce à une succession de bioréacteurs aérobies et anaérobies. L'enjeu est ici de développer un procédé biologique semi-passif capable de traiter ces effluents complexes sur le long terme et à moindre coût.

Les perspectives

Au cours de ces dernières années, le développement de nouveaux outils a permis de progresser sur la faisabilité des traitements biologiques. Par exemple, la détection par biologie moléculaire de microorganismes capables de dégrader un polluant spécifique ou la réalisation d'essais de faisabilité standardisés en laboratoire permettent de sécuriser un traitement.

D'un point de vue opérationnel, les traitements biologiques *in situ* ou sur site sont mieux maîtrisés qu'ils soient aérobies, anaérobies ou même couplés. Néanmoins, il semble encore possible de repousser les limites des traitements biologiques, notamment en travaillant sur :

- Le **prétraitement chimique des polluants** dits récalcitrants. C'est le cas des fameux PFAS, polluants éternels, mais aussi de beaucoup de pesticides ou de molécules fortement halogénées. L'attaque initiale du polluant par voie chimique peut permettre à la biologie de terminer la dégradation.
- La **biodisponibilité/bioaccessibilité du polluant**, notamment en fin de traitement quand la teneur résiduelle est faible.
- La **conception préalable** (essais amont) et le **monitoring** du traitement de sorte de sécuriser le traitement

Ces axes d'optimisation des traitements biologiques doivent être couplés avec des **études d'écotoxicité**. Un prétraitement chimique peut aboutir à la formation de sous-produits tout aussi toxiques et mobiles que le polluant initial. De même, un prétraitement visant à augmenter la biodisponibilité du polluant peut augmenter la toxicité du sol. Avant d'essayer de désorber un polluant ou de l'attaquer au risque de le rendre plus mobile ou toxique, il est important d'évaluer si le polluant résiduel pose réellement un problème sanitaire ou environnemental. Cette question renvoie à des études d'écotoxicité, et à une réflexion plus globale sur les seuils de dépollution.

4B. Injection de fluides pour la mobilisation des phases pures •

Présidence d'atelier : Martin Gaboriau (SNCF)
et Arnault Perrault (Colas/UPDS)



Le constat

La gestion des produits en phases pures (NAPL) dans les milieux naturels reste un **défi majeur pour les réhabilitations de sites pollués**. En effet, du fait des masses de polluant en jeu et des risques de diffusion, elles sont relevables d'une identification en tant que pollutions concentrées et sources de pollution selon la méthodologie nationale et doivent faire l'objet des mesures de gestion visant leur suppression. Pour autant, dans de nombreux cas, l'atteinte de cet objectif reste complexe et incertaine. Des innovations sont donc en développement pour **optimiser et fiabiliser la récupération des phases pures**.

Un des axes de développement les plus pertinent vise à limiter (ou exploiter) **l'anisotropie et les hétérogénéités du sol**, no-

tamment en termes de contraste de perméabilité. Ces variabilités locales sont en effet souvent la cause de chemins de traitements préférentiels, limitant les zones d'effet des récupérations classiques de NAPL et entraînant des pollutions résiduelles significatives. Pour contrer cela, l'utilisation de **fluide non newtonien** est testée depuis plusieurs années. Qu'ils soient composés de mousse (mélange de gaz et d'une solution de tensioactifs) et/ou une solution de polymère (fluide visqueux obtenu par ajout de polymères dans une solution aqueuse), ils sont formulés pour que leurs propriétés physiques s'adaptent aux caractéristiques du milieu et à la pollution à traiter.

Les propriétés des **mousses injectées** peuvent être utilisées pour plusieurs types d'applications. Elles permettent de répartir les tensioactifs de manière homogène

dans le milieu poreux et aider à la récupération NAPL, ou encore de faciliter le transport d'un réactif chimique (vectorisation d'un oxydant). Elles peuvent également bloquer l'écoulement dans un milieu perméable. Toutes ces applications ont fait l'objet de plusieurs projets de recherche avec des essais aux échelles pilotes présentant des résultats intéressants. Les mousses sont aujourd'hui une des techniques évaluées pour augmenter les rendements épuratoires des traitements de NAPL. Les problématiques d'industrialisation des procédés, d'optimisation des formulations et de durée de vie font encore l'objet d'évolutions et d'ajustements.

Les acquis / les lacunes

Les avancées les plus récentes présentées portent sur la mise en œuvre des **fluides à polymères** qui, étant donné leurs propriétés spécifiques, permettent d'influer sur le comportement **physique** (viscosité, densité) et **chimique** des fluides (tension interfaciale avec le polluant) pour mobiliser voir désorber la phase pure de NAPL afin de permettre un déplacement homogène jusqu'au système de récupération.

Les essais en laboratoire, et notamment en pilote au sein du BRGM ont ainsi pu montrer l'intérêt de ces fluides et notamment que **la variabilité de leur viscosité selon la perméabilité** (rhéofluidifiant sous contrainte) leur permet effectivement de balayer de manière plus homogène des horizons de perméabilités variables dans les sols saturés ou non en eau.

L'utilisation d'adjuvants pertinents permet également de **modifier les forces d'adsorption du produit sur le sol**, ou d'ajuster les densités des fluides injectés pour optimiser les contrastes avec le produit spécifique à récupérer. Toute une gamme de formulation est en cours de tests en fonction du contexte et du besoin. Ces fluides à polymères semblent particulièrement

intéressants dans le cadre de la récupération des DNAPL qui sont souvent difficilement mobilisables efficacement avec des moyens classiques de pompage.

Par ailleurs, plusieurs travaux ont présenté le couplage de l'utilisation de ces fluides non newtonien pour la récupération de NAPL avec des méthodes de suivis géophysiques (méthodes électriques type résistivité notamment). L'objectif vise, dans un premier temps, à réaliser des **visualisations rapides et non invasives des effets des injections de fluides** en pilote, permettant ainsi une bonne compréhension des mécanismes à l'œuvre, mais aussi in fine servir de moyen de **suivis efficace des chantiers de dépollution des NAPL**. Néanmoins, l'ensemble de ces innovations mériterait d'être testée en conditions réelles sur des sites et pollutions multiples afin de démontrer leur robustesse technico-économique.

Les perspectives

Il reste néanmoins à progresser sur la **composition de ces fluides** et de leurs adjuvants pour mieux appréhender leurs comportements sur des matrices complexes, notamment sur le long terme.

Par ailleurs, des essais sur terrains réels sont également à envisager pour lever les incertitudes inhérentes au changement d'échelle et pour une évaluation des coûts de mises en applications dans des contextes variables.

La combinaison ou les phasages successifs avec des méthodes et des moyens plus classiques devra aussi être évaluée. Ceci permettrait de définir une « plage d'efficacité » optimum d'utilisation de ces fluides dans le cadre des récupérations de NAPL.



4C. Applications innovantes de traitements des pollutions organiques •

Présidence d'atelier : Laurent Thannberger (Valgo/UPDS)
et Véronique Croze (Element-terre)



Le constat

À partir des caractéristiques (contexte, polluants...), l'outil en ligne **Selecdepol** permet d'identifier, sur des bases théoriques, les solutions a priori applicables. Il constitue une introduction vers les techniques de dépollution, les mesures constructives et de diagnostic, utilisable par un public non spécialiste : familiarisation avec le vocabulaire, exposé de la diversité des solutions.

Il est important de rappeler que Selecdepol est un **outil d'orientation**, ce n'est pas un système expert et il ne se substitue donc pas au rôle de conseil des professionnels de la dépollution, ni aux essais de faisabilité.

L'outil, bien connu et utilisé par la profession, doit prochainement évoluer pour intégrer une rubrique spécifique sur les **retours d'expériences de terrains** et pour permettre d'apporter plus de nuances dans l'orientation des choix de techniques de dépollution. Une rubrique spécifique à la **caractérisation des pollutions** sera également apportée pour sensibiliser les donneurs d'ordres à cette étape fondamentale du processus de gestion des SSP et à la complexité des chantiers de dépollution.

Enfin, les **dispositifs innovants** (dépollution ou caractérisation) seront mis en lumière.

Les acquis / les lacunes

Gestion de la pollution d'une ancienne raffinerie : étant confronté aux pollutions résiduelles d'une ancienne raffinerie, présentant des teneurs fortes à très fortes, WSP a exploré des voies innovantes pour leur traitement ou leur gestion.

Sur les teneurs moyennes, le traitement biologique a étonnamment permis une diminution partielle des teneurs. La technique du feu couvant, ou smoldering, technique tout à fait innovante et non encore mise en œuvre en France jusqu'à présent a montré une efficacité limitée par la présence d'eau lors des essais. Et la gestion s'est finalement faite en s'appuyant sur une démonstration partielle de la limite de mobilité des panaches de pollution et un choix de confinement des sources de pollution concentrées a été fait.

Traitement des composés organo-nitrés : la présentation pour innovante qu'elle soit, a traité de produits très spécifiques. Il existe de nombreuses variétés de produits organiques substitués, qui sont produits par une ou deux usines dans le monde. Cela forme autant de micro-niches, pour les produits, comme pour les techniques de traitement. Des analogies peuvent être envisagées pour d'autres produits, mais la recherche ne peut s'effectuer qu'au cas par cas, lorsque le sujet se présente.

Etudes des barrières hydrauliques et réactives : l'exposé a présenté une problématique récurrente de nombreux systèmes de pompage/injection : le développement d'incrustation par précipitation et/ou prolifération bactérienne.

Les perspectives

Les pollutions et sites pollués sont souvent spécifiques et n'obéissent pas ou peu à des opérations standardisées. Il est indispensable d'étudier en préalable la fai-

sabilité, conception et dimensionnement des solutions les plus pertinentes que ce soit au regard de la complexité des matrices à traiter (sols et eaux souterraines, leur perméabilité, leur géochimie ...) ou au regard de la spécificité des polluants (ex : phase pure peu mobile, composés organo-nitrés, DNAPL...).

Dans ce cadre, **l'accumulation de retours d'expériences peut être utile** pour mieux identifier les solutions potentiellement intéressantes (intérêt de disposer de REX sur SELECDEPOL). De la même manière, il reste indispensable de soutenir **l'innovation** pour développer des solutions plus efficaces sur le plan technico-économique et de partager les expériences fructueuses auprès des parties prenantes SSP et donneurs d'ordres pour pouvoir les intégrer dans les démarches d'appel d'offre.

Les travaux présentés soulignent la nécessité de poursuivre l'évaluation des technologies innovantes (smoldering, barrières réactives, hydrolyse alcaline) pour traiter efficacement des polluants complexes.

Les défis majeurs à lever concernent :

- la gestion des matrices fortement contaminées,
- la faible perméabilité des sols,
- ou encore la stabilité à long terme des traitements.

De nouvelles priorités émergent : **optimiser les procédés en conditions réelles, mieux comprendre les dysfonctionnements observés sur le terrain, et traiter les hydrocarbures lourds** encore mal maîtrisés. Un axe de recherche prometteur réside dans l'étude approfondie des mécanismes d'échec afin d'en améliorer la résilience opérationnelle.

4D. Nouvelles approches pour la gestion des sites pollués par des PFAS •

Présidence d'atelier : Olivier Sibourg (Ramboll) et Arnault Perrault (Colas/UPDS)



Le constat

Les substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS), surnommées « polluants éternels », sont au cœur de préoccupations environnementales majeures en raison de leur extrême stabilité chimique, de leur caractère **persistant**, **mobile** et **bioaccumulatif**, ainsi que de leur **toxicité** avérée pour la santé humaine et les écosystèmes.

Utilisées dans de nombreux secteurs industriels (textiles, mousses anti-incendie, revêtements antiadhésifs, etc.), les PFAS ont été largement dispersées dans l'environnement. Les études menées sur des sites d'entraînement d'extinction d'incendie montrent une contamination

profonde et étendue des sols, souvent accompagnée d'une migration vers les eaux souterraines. L'étendue réelle de cette pollution est d'ailleurs souvent sous-estimée par les analyses ciblées classiques.

Les méthodes non ciblées (oxydation de précurseurs, RMN du Fluor...) révélant des concentrations totales bien supérieures. Ces polluants sont aujourd'hui retrouvés dans tous les compartiments environnementaux et leur présence soulève la nécessité urgente de stratégies de remédiation et d'élimination efficaces et durables.

Les acquis / les lacunes

Malgré de nombreuses recherches, le traitement des PFAS reste un défi technique.

Les méthodes *in situ* de récupération, telles que le lavage de sols à l'aide de solvants, se heurtent à l'hétérogénéité des sols qui favorise la formation de voies préférentielles et limite l'efficacité du traitement. Le recours à des fluides non newtoniens comme les mélanges alcool/bio-polymère s'est révélé prometteur pour améliorer l'uniformité de l'injection et augmenter le taux de récupération des PFAS, atteignant plus de 95 % dans certains cas, en conditions expérimentales. Toutefois, ces méthodes posent la question du traitement en aval des effluents récupérés.

Du côté des procédés destructifs, des approches thermochimiques comme le mélange DMSO (diméthylsulfoxyde, solvant polaire aprotique) /NaOH (hydroxyde de sodium) ont démontré une efficacité élevée pour le **traitement des PFCA** (famille du PFOA, PFHxA, PFBA), avec une défluoration complète de composés à basse température. La **sonoactivation**, quant à elle, permet une minéralisation avancée du PFOS avec une efficacité énergétique significativement améliorée, mais reste encore trop énergivore pour un passage à l'échelle industrielle sans optimisations supplémentaires.

Enfin, le devenir des PFAS dans les sols reste peu compris dans des conditions réelles : leurs dynamiques de transport sont influencées notamment par la structure du sol, les macropores et les particules colloïdales. Par ailleurs, la famille des PFAS comprend plusieurs milliers de molécules différentes, ce qui implique une grande diversité de caractéristiques physico-chimiques (mobilité, solubilité...). En particulier, les dynamiques relatives aux composés à longue chaîne restent encore mal connues.

Les perspectives

Les recherches futures devront se concentrer sur le développement de technologies de traitement combinant efficacité, sélectivité, et sobriété énergétique. L'un des défis majeurs est de passer de résultats prometteurs en laboratoire à des solutions applicables sur le terrain. Cela suppose d'intégrer les contraintes hydrodynamiques réelles des sols contaminés, de mieux caractériser les mélanges complexes de PFAS présents, et de comprendre les mécanismes de transport en phase colloïdale ou via les macropores, en particulier pour les composés à longue chaîne. La modélisation du devenir des PFAS dans des matrices réelles est également une priorité pour guider les choix technologiques. Parallèlement, des efforts doivent être poursuivis pour **améliorer les méthodes analytiques**, en développant des approches non ciblées plus sensibles et plus robustes pour évaluer l'ampleur réelle de la contamination. Les possibilités de combinaison de différentes technologies (extraction *in situ*, concentration puis dégradation des effluents) devront être étudiées. Enfin, il est essentiel de réfléchir à l'intégration des stratégies de remédiation dans une logique d'économie circulaire en lien avec les objectifs européens de réduction de l'usage des PFAS et d'amélioration de la qualité des ressources en eau. Les priorités de recherche devront ainsi conjuguer traitement des sols, gestion des eaux contaminées et analyse du cycle de vie des solutions technologiques pour garantir leur durabilité à long terme.



A. Perrault et O. Sibourg



5A. Compatibilité des indicateurs environnementaux dans la gestion des sites pollués •

Présidence d'atelier : Olivier Sibourg (Ramboll)
et Sébastien Kaskassian (TAUW)



Interview présidents

Le constat

L'intégration des indicateurs environnementaux (fonctions et services écosystémiques des sols, empreinte carbone des chantiers de dépollution) dans les stratégies de gestion et de réhabilitation des sites contaminés permet d'intégrer de **nouvelles approches** dans les projets d'aménagements urbains, de reconversion ou de cessation d'activités industrielles. De nombreuses questions persistent concernant le suivi de ces fonctions écologiques, les impacts économiques et environnementaux, et leur intégration dans les méthodologies de gestion des sites et sols pollués.

Au cours des 10 dernières années, la recherche scientifique a permis de définir de nombreux indicateurs permettant d'évaluer **l'impact de l'anthropisation des sols sur leurs fonctions** (infiltration, fixation du carbone, biodiversité, fertilité, érosion, cycle des nutriments...). Conjointement, la mise en œuvre des méthodes de traitement de la pollution est à l'origine d'externalités négatives que ce soit sur les écosystèmes ou les émissions de GES.

Avec l'évolution de la réglementation comme la loi ZAN, la loi industrie verte, la loi biodiversité, la loi climat et résilience, ou les objectifs de réduction des GES, il apparaît qu'il est désormais possible d'in-

tégrer ces indicateurs dans le domaine des sites et sols pollués. Cependant, devant le nombre d'indicateurs référencés, est-il possible de considérer que tous sont compatibles, voire aisément transposables (mesurables), dans le cadre de projets de gestion des pollutions ou de la démarche nationale de gestion des SSP ?

Cet atelier a permis de faire **des retours d'expériences** sur des projets qui ont intégré des indicateurs environnementaux dans des projets d'aménagement ou de mise en œuvre des modes de réhabilitation.

Les acquis / les lacunes

Les présentations réalisées mettent en évidence la pertinence d'intégrer des indicateurs écologiques et environnementaux en complément des analyses chimiques et physico-chimiques. À l'étape du diagnostic, il apparaît possible et nécessaire de **croiser les interprétations** pédologiques, agronomiques, chimiques et biologiques des sols. À l'étape du plan de gestion, les contraintes du projet et les indicateurs de performance environnementale des divers scénarios de gestion deviennent des critères à intégrer. La complémentarité de ces informations permet l'intégration des enjeux écologiques et environnementaux dans la gestion des sites pollués.

Plusieurs indicateurs ont été développés pour répondre aux enjeux environnementaux de la réhabilitation écologique des sites pollués. Cependant, leur utilisation est liée à l'usage du sol et nécessite des référentiels adaptés.

Il y a un manque de référentiels comme par exemple :

- méthode de référence pour caractériser la biodiversité d'un sol,
- référentiel d'indicateurs standardisé pour homogénéiser les pratiques,
- référentiel permettant d'interpréter les indicateurs retenus par type de milieu,

- référentiels pouvant constituer des objectifs pour des projets de renaturation,
- périmètre de calcul du bilan carbone des opérations de dépollution.

Ce manque de référentiel implique de systématiquement recontextualiser les informations générées et nécessite une expertise pluridisciplinaire au sein des bureaux d'étude spécialisés dans le domaine des sites et sols pollués.

Les présentations réalisées ont également mis en évidence le manque de robustesse de certaines méthodes d'estimation (indicateurs pédologiques en contexte de sites fortement anthropisés intrinsèquement hétérogènes, indicateurs biologiques, bilan carbone) et les contraintes de mise en œuvre. Les verrous identifiés portent notamment d'une part sur **la difficulté de relier « état de pollution » et « réponse des écosystèmes »** (notions d'écotoxicité) et d'autre part l'anticipation de l'évolution temporelle des indicateurs de qualité environnementale selon les actions de gestion recommandées.

La diversité des outils et des prestataires pouvant les réaliser implique également une difficulté dans la bancarisation de la donnée. La méconnaissance des protocoles ou l'absence de norme (de méthodologie consolidée) ne permet pas de démocratiser l'utilisation de ces indicateurs. En complément, l'évaluation des fonctions écosystémiques du sol nécessitant d'une part un croisement de « métiers » et d'autre part un choix des services à rétablir (recommandations des potentialités), une planification, et une coordination, très en amont de ces besoins (projet d'aménagement, usages des sols, diagnostics divers, étude paysagère...) est nécessaire.

Les perspectives

En réponse à la responsabilité sociétale des entreprises (RSE) et à la directive CSRD («Corporate Sustainability Reporting Directive»), et devant les perspectives portées par les enjeux de renaturation (décret décembre 2022 relatif à la définition des types d'usages dans la gestion des sites et sols pollués), la potentialité offerte par les sites naturels de compensation, de restauration et de renaturation (SNCRR), les différents acteurs de la gestion des sols devraient être sensibilisés aux enjeux liés à l'utilisation de nouveaux types d'indicateurs environnementaux (biodiversité et fonctions des sols, bilan carbone des opérations de réhabilitation, etc.). L'intérêt croissant de ces outils par les bureaux d'études spécialisés dans le domaine des sites et Sols pollués implique la nécessité de développer un ou des modèles associés à des référentiels permettant de synthétiser et d'interpréter les informations données par ces indicateurs.

Il pourrait également être intéressant de comprendre les liens/interactions qui existent entre les différents indicateurs de qualités (géotechnique, pollution, agronomique...) des sols et de fonctions écologiques des sols.

Au stade du diagnostic, la liste de ces indicateurs et des modes d'interprétation (référentiel) bénéficierait encore d'un retour d'expérience venant de projets d'aménagement aux contextes et usages diversifiés (reconversion pour une ZAC ou renaturation par ex.).

Au stade de la planification des mesures de gestion de la pollution et d'aménagement, il conviendra également de consolider les connaissances :

- comment rétablir ou améliorer les fonctions du sol ?
- comment choisir la méthode de dépollution limitant la perte de fonctions et minimisant l'émission carbone ?
- comment mesurer l'évolution temporelle du retour au « bon état » des fonctions écologiques ?



S. Kaskassian et O. Sibourg

« La diversité des outils et des prestataires pouvant les réaliser implique [...] une difficulté dans la bancarisation de la donnée »

5B. Nouvelles opportunités pour de nouveaux usages des fonciers délaissés •

Présidence d'atelier : Véronique Croze (Élément-terre Solutions) et Hubert Léprond (EDF)



Le constat

Les terrains délaissés sont encore nombreux à l'échelle du territoire national. Les expressions pour les qualifier sont nombreuses et étaient jusqu'alors plutôt négatives : friches, points noirs, verrues...

À l'heure actuelle, ces terrains représentent **un nouvel intérêt** avec la conjugaison de différents facteurs : pression foncière dans les zones urbaines, développement des énergies renouvelables, préoccupation grandissante liée aux enjeux de biodiversité, objectif de réduction de l'artificialisation lié au ZAN, allocation de fonds complémentaires liés au plan de relance ou au fond vert.

L'enjeu de cet atelier est donc de présenter les nouvelles approches permettant de caractériser et gérer ces terrains jusqu'alors délaissés en se focalisant évidemment sur les aspects en lien avec le sol que ça soit sur une échelle très petite (compréhension des effets sur une plante) à une déclinaison plus globale (intégration des aspects biodiversité dans l'exploitation d'un site ou dans sa mise en sécurité).

Les acquis / les lacunes

Le principal résultat de cet atelier est de démontrer qu'un futur est possible pour les terrains délaissés même si les ambitions peuvent être limitées selon le degré de pollution du site. Il peut s'agir simple-

ment de mettre en sécurité le site ou bien de concilier les enjeux liés à la pollution pour avoir une action bénéfique.

Dans ce cadre, 2 types d'actions se dégagent :

1. L'intégration des enjeux biodiversité voire l'augmentation de la biodiversité ou encore de culture sur les terrains pollués. Les effets peuvent être directement en lien avec l'objectif visé afin de protéger des espèces présentes sur le terrain ou alors, cela peut être un effet induit par une technique de phytomanagement (phytoextraction notamment) en tenant compte des facteurs limitants (fertilité, quantité d'eau, concurrence entre les espèces végétales...);

2. L'optimisation d'un nouvel usage, notamment de production énergétique du terrain en démontrant que la mise en place d'un couvert végétal sous des panneaux photovoltaïques augmente le ratio de performance via la diminution de la température en face arrière des modules photovoltaïques.

Les principales lacunes identifiées au travers de cet atelier sont les suivantes :

- Tout d'abord, une prédominance pour ne pas dire une exclusivité des problématiques liées aux composés minéraux. Aucun des sujets présentés n'était orienté sur les composés organiques ce qui montre encore le chemin à parcourir pour intégrer à la fois les enjeux biodiversité et les fonctions du sol dans la réhabilitation pour des fonciers dégradés ;
- Le deuxième point, c'est que les approches sont encore naissantes et très en amont d'une application opérationnelle généralisée : thèse en cours, observation de phénomènes, mais sans avoir toutes les clés de compréhension...
- Enfin, il peut être signalé l'absence de cadre méthodologique formel dans le-

quel ces différents travaux s'inscrivent. Ainsi, les projets présentés consistent à évaluer les effets ou l'absence d'effets de plantes implantées sur des fonciers délaissés. Au-delà d'une approche globale sur l'intégration des enjeux liés à la biodiversité dans le cas de la mise en sécurité d'une ancienne zone de stockage de déchets de résidus miniers, il n'y a pas encore l'émergence d'approche méthodologique permettant d'orienter les utilisateurs vers des typologies d'usage données.

Un autre constat qui peut être formulé est que les problématiques « émergentes » type microplastiques et PFAS, bien que représentant un fort intérêt général, n'ont pas fait l'objet de présentations dans l'atelier certainement parce que ces problématiques sont assez peu investiguées et ainsi responsables de la mise en sommeil voire l'abandon de fonciers. Pour autant, il est vraisemblable que, dans le futur, de tels cas seront observés.

Il est intéressant de noter que dans l'atelier « Nouvelles opportunités pour de nouveaux usages des fonciers délaissés » les aspects « sociologiques », « politiques » et « économiques » n'ont pas été abordés.



H. Léprond et V. Croze

Les perspectives

Au travers des différentes présentations et interventions réalisées tout au long de l'atelier, l'intérêt pour les fonciers délaissés est manifeste et une préoccupation grandissante est relevée autour du devenir de ces terrains est constaté.

Du point de vue de la recherche, les principaux axes identifiés concernent :

1. La mise en évidence des éventuelles dégradations des fonctions du sol et le test de scénarios de réhabilitation écologique pour restaurer ces fonctions tout en assurant un usage du site (autre que renaturation). Cela suppose d'identifier des sites pilotes caractérisés précisés en amont des travaux de réhabilitation et un suivi post travaux sur le long terme ;

2. La poursuite de travaux de recherche sur les facteurs de concentration et/ou transfert dans les plantes, les paramètres qui gèrent ces concentrations en particulier lorsque les variations de concentrations intra-espèce sont plus fortes que celles inter-espèces ou pour vérifier si les parties les plus volumineuses de la plante présentent bien de manière générale les plus fortes concentrations et quels sont les paramètres qui contrôlent ce phénomène ;

3. L'identification des facteurs de biodiversité, en particulier, les facteurs qui conduisent au développement de la biodiversité sur les terrains a priori déshérités. S'agit-il de facteurs techniques, économiques, temporels ? Ce dernier point serait aussi l'occasion d'aborder des notions d'acceptabilité par les parties prenantes, mais aussi les mécanismes financiers qui pourraient être activés pour reconnaître l'intérêt de ces terrains : pourraient-ils être ouverts à de la compensation écologique par exemple ?

Ensuite, à l'heure où des questions commencent à se poser sur la révision de la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués, il convient effectivement de réfléchir à l'intégration des enjeux de biodiversité selon une approche pragmatique et opérationnelle avec quelques principes de base : proportion aux enjeux réels du site, conserver de la souplesse et de l'adaptabilité, mais aussi évaluer et quantifier les impacts du chantier à la lumière des bénéfices voire les gains sur la biodiversité sur le long terme (notion de bilan environnemental global).

“ **Le principal résultat de cet atelier est de démontrer qu'un futur est possible pour les terrains délaissés.** ”



6A. Enjeux environnementaux et sanitaires de la requalification des friches à risque de pollution •

Présidence d'atelier : Véronique Huon de Kermadec (Ville de Paris)
et Thomas Lacaze (EPF Île-de-France)



Le constat

La reconversion du foncier pollué est une thématique déjà bien étudiée comme l'a montré le bilan de l'ADEME sur les projets réalisés sur les 15 dernières années. De nombreux projets (études, thèses, projets R&D) pluridisciplinaires ont été menés ou sont en cours. Aux disciplines « historiques » (géologie/pédologie, chimie, écologie/biologie/agronomie), s'ajoute désormais une nouvelle discipline « sciences humaines, économiques et sociales », montrant **l'importance grandissante du sujet de la réhabilitation des sols et de la reconversion du foncier**.

Le thème majoritairement traité à travers les différents projets est la réponse aux enjeux écologiques et sanitaires (vs l'évaluation de la multifonctionnalité des sols et l'élaboration des référentiels, l'intégration des critères économiques et sociétaux, etc.), ce qui s'explique par l'historicité de ce thème, mais aussi par son importance.

L'enjeu de la restauration des fonctionnalités des sols est lié à leur nature, leur environnement et leur histoire. Par exemple, le cas de cette halde minière du territoire de l'Hérault où l'exploitation des minerais au XIX^e et XX^e siècle a laissé des sites contaminés par les éléments traces métalliques/métalloïdes, susceptibles d'impacter l'environnement du site via l'érosion éolienne

et hydrique ; les deux cas relatifs à l'évolution des espaces verts en zone urbaine, marqués par l'activité urbaine et industrielle (p. ex. Métropole Européenne de Lille), devenant des espaces urbains sans véritable usage ni fonction (le long des axes routiers ou ferroviaires, à proximité d'anciens sites industriels, etc.) et présentant des contaminations diverses d'origines géogènes et/ou anthropiques (fonds pédo-géochimique, circulation automobile, dépôt de remblais pollués, pratiques culturelles des jardiniers, etc.).

Ces contaminations, quelle que soit leur origine, peuvent présenter des risques sanitaires pour leur environnement, les usagers de ces sites ou les habitants vivant à leur proximité via des mécanismes de transfert comme l'ingestion de terres (par exemple dans un espace vert) ou de poussières contaminées (par exemple émises par des haldes minières), l'ingestion d'eau contaminée (impactée par les écoulements d'anciens sites miniers), ou encore via l'ingestion de légumes autoproduits contaminés.

De plus, ces risques environnementaux et sanitaires sont étroitement liés aux caractéristiques spécifiques des sols (agronomiques, biologiques, chimiques, etc.), ce qui les rend extrêmement variables d'un site à l'autre et difficilement appréciables par des approches génériques, notamment leur évolution dans le temps.

Les acquis / les lacunes

Dans un contexte global de prise en compte grandissante des enjeux environnementaux, la réhabilitation de ces espaces dégradés à risque de pollution devient une nécessité pour les territoires.

Il s'agit de restaurer des espaces à l'abandon, en améliorant les usages et/ou des fonctions écologiques des sols dégradés (ex. : sols compacts, sols pollués, etc.) et

pouvant présenter un risque sanitaire et environnemental.

Pour répondre à ces enjeux environnementaux, plusieurs solutions techniques peuvent être proposées avec pour objectif de réduire les risques sanitaires et environnementaux liés à la pollution des sols : la phytostabilisation, la mise en culture d'un sol ou encore la reconstruction de sols à l'aide du génie -pédologique.

1. Le besoin de protection de l'environnement d'une contamination en éléments trace métalliques a nécessité la mise en œuvre d'un procédé de phytostabilisation par l'usage de plantes métallocoles indigènes potentiellement présentes sur site avec un double objectif : d'une part, reconstruire une couverture végétale permettant de stabiliser les sols afin de limiter les phénomènes d'érosion des sols pollués et réduire les risques sanitaires associés (envol de poussières et ruissellement des eaux) ; d'autre part, stabiliser les polluants afin de limiter leur migration.

2. Un projet de potager en zone urbaine ou périurbaine nécessite des études multicritères intégrant des approches de maîtrise des risques sanitaires et des techniques agricoles. Ces études trouvent des éléments de réponse prometteurs grâce à l'utilisation d'amendements organiques et minéraux permettant la réduction de la mobilité, de la biodisponibilité et de la phytodisponibilité des éléments présents à l'état de trace dans les sols.



T. Lacaze et V. Huon de Kermadec

6A. Enjeux environnementaux et sanitaires de la requalification des friches à risque de pollution (suite)

Ces amendements peuvent en effet modifier les paramètres physico-chimiques des sols et réduire la disponibilité environnementale des contaminants.

3. La reconstruction d'un sol via le génie pédologique avec la création de plusieurs couches pédologiques via l'apport de matériaux exogènes permet aussi de répondre au besoin de gain de fonctionnalité des sols, l'objectif étant de créer des sols résilients, capables de stocker du carbone, des nutriments et de l'eau, tout en présentant une bonne capacité d'infiltration.

Cependant, chaque site présente des caractéristiques spécifiques que ce soit au niveau des paramètres chimiques, physiques, biologiques ou au niveau des contaminants présents (éléments traces métalliques, hydrocarbures, etc.).

Il est donc crucial de tenir compte des spécificités de chaque site et d'aller au-delà de la caractérisation de la pollution des sols en intégrant des paramètres agro-pédologiques dans les diagnostics et afin d'améliorer la conception d'un projet, notamment dans le cas d'agriculture urbaine.

Les perspectives

La réponse aux enjeux environnementaux de la requalification des friches passe par le développement d'outils numériques pour quantifier les gains de fonctionnalité des sols permettant ainsi d'adapter les actions à mener (type d'amendement, quantité, etc.).

Chaque site étant différent, les actions à mener pour les requalifier sont très spécifiques. Elles ne peuvent donc pas être reproduites telles quelles et doivent systématiquement être adaptées. Il est donc très important d'organiser la capitalisation de ces études et de leurs résultats ;

à ce titre, le travail de synthèse présenté par l'ADEME et Terracota Environnement devrait faciliter l'accès à ces données et permettre de développer ces techniques et ces approches multicritères.

De plus, la reconversion des friches vers des usages renaturation fait appel à des techniques innovantes nécessitant l'appropriation par les riverains et/ou les citoyens (les techniques de réhabilitation écologique nécessitent parfois des périodes longues avant d'atteindre le paysage attendu).

La transmission des connaissances acquises vers les citoyens peut constituer un enjeu important et des outils de sciences participatives peuvent être de bons leviers pour faciliter l'acceptation sociale d'un projet de renaturation.

Enfin, pour chaque projet, un enjeu revient : la question de la mémoire et de la pérennisation des espaces requalifiés. Une perspective est ainsi de travailler sur la communication faite autour de la requalification auprès de différents acteurs (association, collectivité...), afin que les actions soient sécurisées et que l'histoire des sites soit conservée (ex. : mise en place de servitude, SIS etc.).

“ La requalification des friches passe par le développement d'outils numériques pour quantifier les gains. ”



6B. Démarches participatives des citoyens et des acteurs impliqués dans la gestion des sites pollués •

Présidence d'atelier : Pierrick Esnault (ministère des Armées),
et Béatrice Bechet (Univ Eiffel, campus de Nantes/IFSTTAR/IRSTV/Allenvi)



Le constat

Cet atelier s'est intéressé au développement de démarches participatives dans le cadre de la gestion des sites pollués.

Ainsi, les présentations ont porté sur les facteurs qui vont impacter l'implication des différentes parties prenantes, et, à l'inverse, comment la participation des parties prenantes va faciliter l'appropriation des différentes études et éléments techniques du dossier, et, *in fine*, l'adhésion.

Fort de ces enjeux, les présentations ont en premier lieu abordé l'appropriation de points très techniques, telle que la gestion

des incertitudes. Celles-ci commencent à être appréhendées dans le domaine des « Sites et Sols Pollués » et intégrées dans les études. Mais comment sont-elles prises en compte et valorisées par les différents acteurs de la gestion des sites pollués et par les décideurs ?

Les acquis / lacunes

Pour y répondre, une enquête a été réalisée par une spécialiste de la communication et du planning stratégique, ne connaissant pas le domaine des SSP et de l'aménagement, auprès d'une cinquantaine de personnes intervenant dans le processus de gestion d'un site pollué.

Lors de cette enquête, **4 sources d'incertitudes**, qualifiées de « brèche » ont été identifiées :

La brèche du référent :

- L'absence de valeur de référence absolue introduit une gestion au cas par cas, notamment vis-à-vis de l'usage
- Les avis des services de l'État sont perçus comme source d'incertitude

La brèche de la temporalité :

- Les acteurs ont des contraintes temporelles antagonistes : de ce fait, les délais trop contraints imposés par l'aménageur donnent un sentiment de « mauvais travail » aux acteurs sites et sols pollués.
- L'absence de capitalisation dans le temps entraîne également des lacunes de transmission de l'historique des diagnostics

La brèche du processus d'action

- Il y a un conflit entre la linéarité du projet d'aménagement et le processus itératif des études sites et sols pollués, qui nécessitent au contraire une adaptabilité du projet
- Il est également observé une absence de politique de limitation des risques par une réflexion en amont des projets

La brèche de l'interprétation des résultats

- Les maîtres d'ouvrages non-sachants se trouvent confrontés à des résultats difficilement appropriables. Des outils de communications adaptés leur permettraient d'interpréter les résultats.

Les résultats ont mis en évidence l'absence de mobilisation des estimations mathématiques des incertitudes par les acteurs interrogés tout en reconnaissant l'intérêt de ces études d'incertitudes.

Le processus décisionnel de la gestion des pollutions est considéré comme manquant de fluidité par les acteurs. Des enjeux d'anticipation et de gestion des

risques en amont sont également mis en exergue. Ainsi l'enquête met en avant l'usage d'outils de visualisation des données et incertitudes associées pour disposer d'un outil appropriable par le maître d'ouvrage non-expert.

De manière plus générale, les enjeux de diffusion des données auprès du public ont été abordés. Plusieurs retours d'expérience, telle la gestion des territoires de l'après-mine, mettent en avant les tensions pouvant exister entre les experts, collectivités, aménageurs et populations locales.

En effet, les citoyens, non-sachants, peuvent être « enquête » de données sur la pollution historique des sols de leur quartier. L'absence de communication, de transparence sur les résultats des études et les incertitudes inhérentes peuvent engendrer le manque d'adhésion de la population locale au projet envisagé sur un site. Ces différences de point de vue s'expliquent par des enjeux propres à chaque acteur : réalisation de son projet dans le respect d'un calendrier et d'un financement pour le promoteur, respect des normes réglementaires par les services instructeurs, préservation de la santé et tranquillité pour les citoyens.

Lorsque ces divergences de point de vue sont prises en compte en amont des projets par une approche pluridisciplinaire, ces tensions peuvent être amoindries.

La mise en place de comités de suivi démontre qu'il est possible de trouver ensemble des solutions de gestion ou en s'appuyant sur **une mission de tiers de confiance**.

Une illustration est donnée au travers de la réhabilitation du site d'une **ancienne blanchisserie à Montreuil**, polluée par des métaux et des composés organiques volatils. Lors de la présentation des résultats des études, des tensions sont apparues



B. Bechet et P. Esnault

entre population locale et acteurs de la gestion du site. Suite à ce constat, la mission de tiers de confiance a été mise en place. L'objectif du tiers de confiance était de partager les enjeux de chaque acteur et de leur redonner confiance dans les résultats scientifiques par l'organisation de visites de site, de réunion d'information, de contacts avec la population locale.

Il assurait également une traduction des documents d'études d'une manière neutre auprès des populations riveraines et collectivités, favorisant ainsi l'appropriation des éléments techniques par les différentes parties prenantes.

Cette démarche, très novatrice, permet le partage des connaissances. Les citoyens peuvent eux aussi apporter des informations utiles sur les nuisances olfactives, les intrusions, l'identification des voies de transferts associées (irrigation...) aux experts de la gestion de la pollution. Ce partage de connaissance a permis de réduire les tensions autour du projet de réhabilitation du site.

Les perspectives

Issus des présentations et des échanges, des éléments prospectifs sont proposés :

- **Créer des outils de visualisation des données** en se « mettant à la place » des différentes parties prenantes : maître d'ouvrage, et en suivant son processus de travail, riverains
- **Développer la culture du risk-management** dans l'aménagement des sites et sols pollués
- **Clarifier les responsabilités des acteurs** pour éviter certaines frilosités et redonner confiance.

Il est nécessaire de passer d'une recherche classique (dans laquelle les acteurs font des choix en fonction de leur connaissance sans prendre en compte les populations qui cherchent à faire connaître les questions, leurs attentes) à une gestion partagée sur la base de méthodes de concertation, voire de co-création effectives.

Les sciences sociales peuvent apporter/ donner une grille de lecture des différents enjeux des groupes sociaux et favoriser la communication et la compréhension commune des enjeux. L'approche sociologique peut permettre aux techniciens, ingénieurs et chercheurs de concevoir des solutions adaptées aux réalités sociales, tout en anticipant mieux les réactions et besoins des publics cibles. Cette réflexion doit avoir lieu en amont ou pendant la gestion pour prendre en compte les attentes.

Connaître son environnement et les risques associés permet une meilleure intégration des besoins de prévention et de protection.

La synthèse des principales pistes de recherche

Les principaux enseignements issus de chacun des 15 ateliers des 5^e RNR SSP sont classés selon le référentiel ADEME des 6 thèmes de Recherche dans le domaine des sites pollués et friches - voir ci-dessous. Ils sont présentés selon une dynamique temporelle d'évolution de la Recherche : **Ce qui a le plus avancé / Besoins toujours valides / Nouvelles priorités 2025.**

Certains domaines de Recherche ayant été peu ou pas abordés durant les 5^e RNR, ces tableaux de synthèse ne prétendent pas à l'exhaustivité.



Thème 1 : Caractérisation des milieux...p.33

Thème 2 : Compréhension des mécanismes et transferts de polluants...p.34

Thème 3 : Évaluation des expositions et des impacts sur le vivant...p.35

Thème 4 : Techniques de traitement et maîtrise des impacts...p.36

Thème 5 : Approches territoriales de reconversion du foncier...p.37

Thème 6 : Réhabilitation écologique des sols pollués...p.38

Thème 1 : Caractérisation des milieux •



Ce qui a le plus avancé

Approches et outils de caractérisation *in situ*

- Maturité des techniques de dendrochimie et de phytoscreening pour les COHV et métaux
- Émergence de laboratoires de mesures sur le terrain (données en temps réel)

Outils de traitement et de cartographie des données

- Interprétation et modélisation des données dans des cartes d'anomalie à l'échelle de la France hexagonale
- Définition de fonds (pédo)-géochimiques à l'échelle des métropoles
- Spatialisation des risques sanitaires à l'échelle d'un site pour adapter le projet d'aménagement à la présence de pollution



Besoins toujours valides

Approches et outils de caractérisation *in situ*

- Outils cartographiques par dispositifs de mesure embarqués (drone)
- Caractérisations des contaminations par des microplastiques et des PFAS
- Restituer les résultats obtenus *in situ* par des laboratoires de terrain dans le temps de l'intervention
- Vérification de la légitimité des outils sur site / croisement des méthodes

Outils de traitement et de cartographie des données

- Diffuser et rendre accessible les outils de traitement et de cartographie des données
- Rendre interopérables et automatisables les approches de définitions des fonds et des anomalies géochimiques
- Enrichir et consolider les cartographies et seuils définis aux différentes échelles (croisement des différentes BDD)



Nouvelles priorités 2025

Approches et outils de caractérisation *in situ*

- Développer une approche globale, intégrant la caractérisation du sol et ses fonctionnalités **[R&D]**
- Renforcer les méthodes d'acquisition de mesures *in situ* (sols / eaux souterraines) **[R&D]**
- Identifier et déterminer la présence de fibres d'amiante sur le terrain **[R&D]**
- Coupler les résultats des laboratoires de terrain avec de l'IA pour en faciliter et automatiser l'exploitation **[Accompagnement]**

Outils de traitement et de cartographie des données

- Inclure de nouveaux paramètres physico-chimiques (pH, argile, MO, éléments lixiviables, etc.), les polluants diffus (pesticides, microplastiques, PFAS...) et des indicateurs de fonctionnalité des sols **[R&D]**
- Promouvoir les outils innovants de traitement et de cartographie des données et les ReX de mise en application par les acteurs dans différents contextes (gestion de pollution vs. valorisation des terres) **[Accompagnement]**
- Faire évoluer la méthodologie de valorisation des terres provenant de SSP en projet d'aménagement en la couplant aux bruits de fond et aux seuils pédogéochimiques pour la rendre plus opérationnelle **[Méthodologie]**

Thème 2 : Compréhension des mécanismes et transferts de polluants •



Ce qui a le plus avancé

Milieus sols et eaux souterraines

- Maturité des modèles en Recherche pour simuler les transferts multiéchelles / multiphasiques / multicomposants

Transferts vapeurs dans bâtiments

- Caractérisation des sources en lien avec l'hétérogénéité des milieux
- Modélisation des mécanismes de migration des polluants volatils dans un futur bâtiment
- Métrologie des polluants gazeux en air intérieur et gaz du sol sur de courtes et longues périodes
- Connaissance et modélisation des phénomènes de biodégradation des BTEX dans la zone non saturée
- Solution analytique simplifiée de dimensionnement du réseau de drainage des gaz du sol pour SDS



Besoins toujours valides

Milieus sols et eaux souterraines

- Intégration de la composante biologique dans les systèmes réactionnels
- Approche globale sur la réactivité de la matrice et la spéciation de divers polluants dans les eaux
- Alimentation des approches de modélisation par l'acquisition de paramètres de terrain nombreux et spécifiques au milieu et au polluant
- Poursuivre les approches combinées « terrain – pilote/laboratoire »
- Statuer sur l'appréciation quantitative de l'importance de la composante du transfert colloïdal des polluants

Transferts vapeurs dans bâtiments

- Tester les outils développés (guides, modèles...) en conditions réelles (caractérisation du milieu air intérieur et dimensionnement SDS)
- Évaluer les performances des SDS actifs et des SDS passifs combinés à des dispositifs de drainage sous dalle en situation réelle (in situ)



Nouvelles priorités 2025

Milieus sols et eaux souterraines

- Appui aux politiques publiques d'infiltration des eaux pluviales dans un contexte de pollution de sol résiduelle [R&D / Accompagnement / Méthodologie]
- Impacts du changement climatique (variations niveau de nappe, saturation des sols...) sur les mobilisations des polluants [R&D]
- Anticipation de l'évolution des matériaux à terre (ex. : sédiments de dragage) [R&D / Accompagnement / Méthodologie]
- Développer des suivis sur la durée pouvant faire passer les sites au stade de démonstrateurs [Accompagnement]

Transferts vapeurs dans bâtiments

- Disposer de sites réels équipés pour un suivi des performances des SDS [Accompagnement]

Thème 3 : Évaluation des expositions et des impacts sur le vivant •



Ce qui a le plus avancé

Pour le volet exposition

- Outils de caractérisation de la bioaccessibilité (UBM et HCI) pour Pb, Cd et As

Pour le volet impact (tox / écotox)

- Mise en œuvre et retour d'expérience de l'approche TRIADE
- 1^{ers} travaux sur les multi-contaminations
- Mise en évidence que des polluants différents (par ex. un métal et un HAP) pouvaient conduire à des effets similaires



Besoins toujours valides

Pour le volet exposition

- Étendre la caractérisation de la bioaccessibilité à d'autres polluants inorganiques (Ni, Cr...) et organiques persistants (PCB, HAP...)
- Rapprochement entre approches sanitaires et environnementales (associant mesures des teneurs totales, biodisponibilité, phytodisponibilité et bioaccessibilité orale)

Pour le volet impact (tox / écotox)

- Identification des modes d'action toxiques, notamment interactions entre contaminants (effet cocktail)
- Distinguer les effets liés spécifiquement à la pollution de ceux liés à la nature initiale du sol
- Corréler les modifications taxonomiques et fonctionnelles à la dégradation du milieu



Nouvelles priorités 2025

Pour le volet exposition

- Scénarios pour des durées d'exposition longues, incluant des mélanges de contaminants (notamment émergents) et des gammes de concentrations environnementalement pertinentes [R&D]
- Conduite d'étude intégrée où l'imprégnation des personnes (dépistage) serait menée de manière conjointe avec la modélisation de leur exposition à leur environnement en intégrant la bioaccessibilité orale [R&D]
- Transposer l'approche bénéfice/risque sur des usages récréatifs (tel le jardinage) pour fournir un éclairage plus global à la prise de décision [Accompagnement / Méthodologie]
- Centraliser un REX intégrant les notions de biodisponibilité sanitaire et environnementale sur des sites variés (pollution, physico-chimie, usages du site...) [Accompagnement]

Pour le volet impact (tox / écotox)

- Développer des approches par familles de polluants vs un nombre limité de composés dans une famille (PFAS, HC, HAP, CAP-O...) [R&D]
- Produire des valeurs guides environnementales (VGE), provisoires et révisables, en les associant avec des valeurs toxicologiques de référence interne (VTRI) [R&D]
- Développer des méthodes innovantes de modélisation d'évaluation des impacts (tox / écotox), notamment fondées sur des techniques d'IA [R&D]
- Intégrer les REX TRIADE dans les travaux de révision de la norme, dans les prises de décision et tester leur applicabilité à la renaturation [Accompagnement / Méthodologie]

Thème 4 : Techniques de traitement et maîtrise des impacts ●



Ce qui a le plus avancé

Traitements des pollutions organiques

- Démonstration de la possibilité de produire sur site les biosurfactant et de les injecter *in situ* pour améliorer l'accessibilité aux polluants
- Référence du couplage oxydation avancée (électro-Fenton) en réponse à la grande stabilité / concentration en polluants
- Standardisation des outils de biologie moléculaire et essais labo pour mieux orienter le choix des traitements biologiques

Mobilisation des phases pures

- Formulation et validation à l'échelle labo et pilote de terrain de l'utilisation de fluides non newtoniens (mousses de tensio-actifs, solutions de polymères...) pour
 - i- limiter l'anisotropie et les hétérogénéités des sols ;
 - ii- modifier les conditions de perméabilité des milieux ;
 - iii- améliorer le traitement des pollutions *in situ* (vectorisation de réactifs) ;
 - iv- améliorer la récupération de DNAPL

Pour les PFAS

- Meilleure compréhension des comportements de la diversité des molécules PFAS dans les différentes matrices
- Appropriation d'une expertise nationale sur des solutions techniques existantes outre-Atlantique



Besoins toujours valides

Traitements des pollutions organiques

- Outils et éléments de suivi des traitements biologiques (ex. : ratio isotopique du carbone, test de biodisponibilité...)
- Démonstration à l'échelle terrain de la dégradation des composés récalcitrants et des métabolites par des consortiums bactériens et fongiques
- Capitaliser les ReX sur les difficultés de traitement (ex : maintenance / colmatage, atteinte des objectifs, effets rebonds post-traitement...) pour mieux circonscrire les fenêtres opérationnelles des techniques et/ou pour identifier les verrous associés

Mobilisation des phases pures

- Améliorer les procédés de récupération de NAPL avec des mousses et optimiser leurs formulations et durées de vie
- Améliorer la connaissance du comportement des solutions de polymères sur des matrices complexes selon leurs compositions et leurs adjuvants
- Évaluer les éventuels impacts environnementaux des fluides et agents réactifs utilisés (ex. : écotoxicité, autorisation réglementaire d'injection...)

Pour les PFAS

- Fiabiliser et démocratiser les analyses des principaux PFAS (dont ceux à chaîne courte < C5 et les métabolites) et/ou indicateur global (TOP Assay) pour les bilans de masse
- Compréhension des mécanismes de transformations biotique et abiotique et de transfert des différents PFAS dans les milieux
- Travailler sur les briques élémentaires du traitement : extraction / concentration / élimination pour optimiser le traitement des PFAS



Nouvelles priorités 2025

Traitements des pollutions organiques

- Couplage de pré-traitements chimiques pour initier la biodégradation de composés récalcitrants (PFAS, HC et HAP lourds, composés fortement chlorés...) [R&D]
- Améliorer la biodisponibilité des polluants dans les sols en fin de traitement, pour abaisser les teneurs résiduelles [R&D]
- Évaluer de manière globale les couplages de techniques pour traiter une pollution et leurs impacts environnementaux et sanitaires (ex. : suivi des métabolites, écotoxicité, fonctions des sols...) [R&D]

Mobilisation des phases pures

- Validation de démarches efficaces de suivi des injections, de dispersion des fluides et de récupération des phases pures (ex. : tomographie en puits, couplage géophysique...) [R&D / Accompagnement]
- Évaluer l'efficacité des traitements en améliorant la caractérisation des masses et flux massiques de NAPL dans les sols et l'environnement (NAPL initial et résiduel) [R&D]
- Démontrer à l'échelle « pilote de terrain » l'efficacité (technico-économique) des fluides non newtoniens dans les opérations de récupération des NAPL, et ce dans différents contextes de pollution et de sites [R&D / Accompagnement]

Pour les PFAS

- Prise en compte des molécules avec réels enjeux de traitement :
 - PFAS insaturés (précurseurs de métabolites) ;
 - chaînes courtes <C5 (dont le TFA) ;
 - composés volatils TFM (Fluorotélomères)... [R&D]
- Solutions de destruction des PFAS très stables [R&D]

Thème 5 : Approches territoriales de reconversion du foncier •



Ce qui a le plus avancé

- Production de guides ayant intégré les enjeux sanitaires et environnementaux liés à la requalification des friches urbaines à risques de pollution
- Émergence d'une discipline « sciences humaines, économiques et sociales » (ex. : évaluation des apports d'un tiers de confiance)
- Développement de méthodes et outils de caractérisation du gisement du foncier disponible (études quantitatives)
- Identification des démarches liées à l'évaluation des risques de pollution pour les intégrer au document d'urbanisme



Besoins toujours valides

- Améliorer les connaissances sur les sols urbains afin de les intégrer dans les stratégies territoriales
- Capitaliser les ReX de l'application des méthodes d'identification des friches à risque de pollution et de quantification des surfaces disponibles à la reconversion
- Mettre en place des démonstrateurs territoriaux de reconversion des fonciers pollués permettant de mieux prendre en compte les spécificités des territoires (enjeux environnementaux et sociaux, conditions pedo-climatiques, ressources disponibles, etc.)



Nouvelles priorités 2025

- Utiliser l'IA et la télédétection pour mieux caractériser les friches en les intégrant à des systèmes d'informations géographiques (SIG) **[R&D / Accompagnement]**
- Développer des outils (ex. : visualisation des données) et une science participative de co-construction entre les acteurs des différentes échelles de la planification jusqu'au projet d'aménagement **[R&D / Accompagnement]**
- Développer des critères sociaux, économiques et fiscaux pour mieux connaître les leviers permettant d'inciter les acteurs à reconquérir les friches à risque de pollution **[R&D / Accompagnement]**
- Sécuriser les suivis long terme et conservation de la mémoire (ex. : mesures constructives, restrictions d'usages...) et/ou les mises en place et pérennisation des espaces requalifiés (ex. : biodiversité, compensation...) **[Méthodologie]**

Thème 6 : Réhabilitation écologique des sols pollués •



Ce qui a le plus avancé

- Intégration des enjeux sanitaires et environnementaux liés à la requalification des friches urbaines
- Développement de méthodologies d'évaluation de la fonctionnalité des sols dans des projets de réhabilitation des friches



Besoins toujours valides

- Démontrer l'intérêt d'une caractérisation agro-pédologique et biologique des sols dans les plans de gestion.
- Définir les indicateurs de qualité environnementale à utiliser et par type de milieux (ex : caractérisation de la biodiversité d'un sol ; bilan carbone des opérations de dépollution...)
- Quantifier les services écosystémiques rendus par les sols (infiltration, fertilité, habitat pour la biodiversité, etc.) dans les opérations de réhabilitation écologique
- Comprendre les liens entre indicateurs de qualité des sols et fonctions écologiques des sols



Nouvelles priorités 2025

- Développer les référentiels d'interprétation des indicateurs environnementaux pour standardiser les méthodes et homogénéiser des pratiques adaptées à la gestion SSP [R&D / Accompagnement / Méthodologie]
- Prédire l'évolution temporelle de la qualité environnementale selon les actions de gestion (indicateurs précoces du retour au « bon état » des fonctions écologiques) [R&D / Accompagnement]
- Développer des méthodologies d'évaluation du bénéfice environnemental, économique et social des opérations de réhabilitation écologique [R&D / Accompagnement]
- Développer la prescription d'objectifs écologiques dans la gestion des SSP et dans les opérations de requalification des friches urbaines [Accompagnement / Méthodologie]
- Structurer les filières de recyclage de matériaux urbains pour la création de terres fertiles à l'échelle du territoire afin de faciliter les opérations de réhabilitation écologique [Accompagnement / Méthodologie]

Synthèse multimédia des 5^e rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués

Les Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués sont organisées par l'ADEME avec ses partenaires tous 5 ans à Paris. Elles sont l'occasion pour les acteurs de la gestion des sites et sols pollués (chercheurs, gestionnaires de sites, sociétés d'études, d'aménagement, de travaux, élus, associatifs, acteurs de la santé publique, services de l'État, etc.) et de l'économie circulaire de partager leurs expériences et de confronter leur point de vue.

Les participants aux rencontres peuvent ainsi :

- s'informer sur les avancées et les faits marquants de la recherche dans le domaine des sites et sols pollués sur les 5 dernières années,
- débattre sur les questions de gestion des sols, qu'ils soient urbains, industriels ou agricoles, pollués par les activités industrielles.

Les recherches orientées sur les pollutions d'origine agricole et radioactives sont exclues du champ thématique de ces rencontres.

Riche en contenus et débats, cet évènement incontournable pour les acteurs du domaine des sites et sols pollués rassemble 400 participants. Cette synthèse multimédia est destinée à un large partage pour orienter et prioriser les besoins de recherche pour la période 2026 - 2030.

L'ADEME EN BREF

Au cœur des missions qui lui sont confiées par le ministère de la Transition écologique, le ministère en charge de l'Energie et le ministère en charge de la Recherche, l'ADEME - l'Agence de la transition écologique - partage ses expertises, coordonne le financement et la mise en œuvre de projets de transformation dans plusieurs domaines: énergie, économie circulaire, décarbonation, industrie, mobilité, alimentation, adaptation et sols.

Elle mobilise les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, et leur donne les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse. Résolument engagée dans la lutte contre le changement climatique et la dégradation des ressources, l'ADEME conseille, facilite et aide au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions. Elle met ses capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un Établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC).

www.ademe.fr