

# intersol'2025



Congrès-Exposition International sur les Sols, les Sédiments et l'Eau  
International Conference-Exhibition on Soils, Sediments and Water

## Pollution des sols : peut-on vivre avec ? Vers une stratégie intégrée !

- Sous nos pieds, comprendre le sol et le sous-sol ?
- Actualités juridiques, réglementaires et normatives
- Évaluations des risques sanitaires et environnementaux
  - Gestion des pollutions : traiter ou vivre avec ?
- Stratégie intégrée pour la gestion pérenne des sols et des sous-sols
- Innovation : session jeunes chercheurs, créateurs, startups

## Soil pollution: can we live with it? Towards an integrated strategy!

- Under our feet, understand the soil and the subsoil?
  - Legal, regulatory and normative news
  - Health and environmental risk assessments
  - Pollution management: treat or live with it?
- Integrated strategy for the sustainable management of soils and subsoils
- Innovation: young researchers, creators, startups session

[www.intersol.fr](http://www.intersol.fr)

25, 26 & 27 mars 2025 – Lyon, France

En partenariat avec :  
In partnership with:



Recyclage  
& Valorisation



### Entreprises / Companies



### Institutionnels / Institutional



# PFAS

PER- AND POLY-FLUOROALKYL SUBSTANCES



5<sup>th</sup> International Congress

## Gestion des Risques Environnementaux & Sanitaires Management of Environmental & Health Risks

17, 18, 19 & 20/06/2025 - Paris

➤ [www.webs-event.com](http://www.webs-event.com) ◀

En partenariat avec / In partnership with:



Interprétation simultanée / Simultaneous translation

CONFÉRENCES - CONFERENCES  
Inscription ▪ Registration

EXPOSITION - EXHIBITION - COMMUNICATION  
Réserver un stand ▪ Book a stand

[www.webs-event.com](http://www.webs-event.com)





## Mardi 25 mars 2025

08h30

Accueil des participants

### **Actualités juridiques, réglementaires et normatives**

*Modérateur : Philippe Oudin, Gérant fondateur - Semaco Environnement*

09h00

Le décret du 4 juillet 2024 relatif à la loi Industrie Verte : les nouvelles dispositions pour la gestion des cessations d'activité et la réhabilitation des sites et sols pollués

*Laurence Lanoy, Avocate en Droit de l'Environnement - Laurence Lanoy Avocats*

09h20

Les enjeux de la conservation de la mémoire et des restrictions d'usages sur les sites et sols pollués

- *Carine Le Roy-Gleizes, Avocate au Barreau de Paris - UGGC Avocats*
- *Alice Messin-Roizard, Avocate au Barreau de Paris - UGGC Avocats*

09h40

Reconversion des friches industrielles vers un usage de renaturation : opportunité ou mirage ?

- *Carine Le Roy-Gleizes, Avocate au Barreau de Paris - UGGC Avocats*
- *Antoine Juquin, Avocat au Barreau de Paris - UGGC Avocats*

10h00

PFAS et sites pollués : anticiper les défis juridiques d'une pollution émergente

*Pauline Leddet-Troadec, Avocate au Barreau de Paris - Latournerie Wolfrom Avocats*

10h20 Questions - Réponses - Discussions

10h30 Pause-café

11h00

Le sol, intrus de la planification territoriale

*Jean-Pierre Aubert, Président - Terres de Métamorphoses*

11h30

## Table ronde

### Réconcilier nature et villes : SFN pour un avenir urbain durable

Réalisation & animation :

- *Romain Garnier, Chef de projet Environnement, Filière Sols - Cluster Eau Milieux Sols Paris Ile-de-France*
- *Christian Nsonda, Chargé de Projet & Innovation Chimie Environnementale et Numérique - Axelera*

Participants :

- *Françoise Heuillard, Chargée de mission Développement Durable - Paris Est Marne & Bois*
- *Caroline Merlet, Animatrice Eaux Pluviales - Grenoble Alpes Métropole*
- *Joseph Perreton, Directeur général - Cap Métropole (Aménageur)*

12h30 Déjeuner

### Stratégie intégrée pour la gestion pérenne des sols et des sous-sols

Modérateur : *Olivier Sibourg, Principal - Ramboll*

13h30

L'évaluation des potentialités écologiques des sols pour l'aménagement durable et la réhabilitation des sites dégradés

*Quentin Vincent, Directeur Technique, Expert Sols Vivants - EODD Ingénieurs Conseils*

13h50

CO2POL – Empreinte carbone des projets et chantiers de dépollution – Établir un référentiel national sur la méthodologie des calculs d'émission et donner des chiffres clés

*Clotilde Johansson, Chargée d'Affaires secteur R&D - Ortec Soleo*

14h10

La problématique des terres pyriteuses dans les travaux souterrains

- *Myriam Duc, Chargée de recherche - Université Gustave Eiffel*
- *Agnès Cherrey, Chargée d'études et de recherche en gestion des matériaux excavés et éco-conception des tunnels - Centre d'Études des Tunnels (CETU)*

14h30

Répondre aux besoins d'assainissement des sols contenant des PFAS grâce à une solution de destruction économe en énergie - Du succès en laboratoire à l'optimisation sur site

*Antoine Brison, Ingénieur procédés environnementaux - Oxyle (Suisse)*

14h50

Fricheco et Appllex : Opérationnaliser un « petit cycle des terres » à Marseille. Une recherche-action pour prendre soin des sols vivants à l'échelle du bassin versant des Aygaldes

*Hugo Maurer, Responsable des projets de territoire et stratégies de R&D - Neo-Eco*

15h10 Pause-café

15h30

Vers un outil d'aide à la décision dédié à l'infiltration des eaux pluviales au plus près de la source, dans un contexte de pollution résiduelle dans les sols

*Marie Lemoine, Cheffe de projet R&D - Ginger Burgeap*

15h50

Traitement des contaminants avec résidus confinés : combinaison de la stabilisation in situ (ISS) et de l'oxydation chimique in situ (ISCO)

*Brant Smith, Directeur de la Technologie - Evonik (Etats-Unis)*

16h10

Gestion des Espèces Végétales Exotiques Envahissantes (EVEEs) sur les sites et sols pollués : Une valorisation innovante par la séquestration

*Sébastien Illovic, Directeur adjoint - ADEV Environnement*

16h30

Traitement thermique sur site des sols d'une ancienne usine de chlore et de soude contaminés par le mercure et des pesticides

*Jan Haemers, Président-directeur général - Haemers Technologies (Belgique)*

16h50

Démarche vertueuse de réhabilitation de friches industrielles par l'économie circulaire, la préservation des ressources et un traitement thermique on site innovant

*Laurent Siblot, Responsable Développement Commercial - Ortec Soleo*

17h10 Questions - Réponses – Discussions

17h30 Fin de la 1ère journée



## Tuesday March 25, 2025

08h30

Welcome participants

### **Legal, regulatory and normative news**

*Moderator: Philippe Oudin, Founder and Managing Director - Semaco Environnement*

09h00

The decree of July 4, 2024 relating to the Green Industry Act: new requirements for managing the cessation of activities and the remediation of polluted sites and soils

*Laurence Lanoy, Attorney in Environmental Law - Laurence Lanoy Avocats*

09h20

The challenges of preserving the memory and restricting use of contaminated land

- *Carine Le Roy-Gleizes, Attorney at the Paris Bar - UGGC Avocats*
- *Alice Messin-Roizard, Attorney at the Paris Bar - UGGC Avocats*

09h40

Converting brownfield sites into natural sites: opportunity or illusion?

- *Carine Le Roy-Gleizes, Attorney at the Paris Bar - UGGC Avocats*
- *Antoine Juquin, Attorney at the Paris Bar - UGGC Avocats*

10h00

PFAS and polluted sites: anticipating the legal challenges of emerging pollution

*Pauline Leddet-Troadec, Attorney at the Paris Bar - Latournerie Wolfrom Avocats*

10h20 Questions - Answers - Discussions

10h30 Coffee Break

11h00

Soil, an intruder in territorial planning

*Jean-Pierre Aubert, President - Terres de Métamorphoses*

11h30

**Round table:**

**Reconciling nature and cities: SFN for a sustainable urban future**

Production & animation:

- *Romain Garnier, Environment Project Manager, Soils Sector - Water Milieux Soils Cluster Paris Ile-de-France*
- *Christian Nsonda, Chemistry, Environment and Digital Innovation Project Manager - Axelera*

Participants:

- *Françoise Heuillard, Sustainable Development Officer - Paris Est Marne & Bois*
- *Caroline Merlet, Rainwater coordinator - Grenoble Alpes Métropole*
- *Joseph Perreton, General Manager - Cap Métropole*

12h30 Lunch

**Integrated strategy for the sustainable management of soils and subsoils**

*Moderator: Olivier Sibourg, Principal - Ramboll*

13h30

Assessment of soil ecological potential for sustainable development and rehabilitation of degraded sites

*Quentin Vincent, Technical Director, Living Soils Expert - EODD Ingénieurs Conseils*

13h50

CO2POL - Carbon Footprint of depollution projects and remediation sites-establish national reference standard of the emission calculations' methodology and provide key figures

*Clotilde Johansson, Business Manager R&D sector - Ortec Soleo*

14h10

The problem of pyritic soils in underground works

- *Myriam Duc, Head of Research - Gustave Eiffel University*
- *Agnès Cherrey, Head of studies and research in the management of excavated materials and eco-design of tunnels - Center for Tunnel Studies (CETU)*

14h30

Advancing PFAS soil remediation with energy efficient destruction solution: From lab success to on-site optimization

*Antoine Brison, Environmental Process Engineer - Oxyle (Swiss)*

14h50

Fricheco and Appllex: Operationalising a 'small land cycle' in Marseilles. Action research to care for living soil in the Aygalades catchment area

*Hugo Maurer, Head of regional projects and R&D strategies - Neo-Eco*

15h10 Coffee Break

15h30

A decision support tool dedicated to rainwater infiltration in a context of soil residual pollution  
*Marie Lemoine, R&D Project Manager - Ginger Burgeap*

15h50

Contaminant Treatment with Sequestered Residuals: Combining In Situ Stabilization (ISS) and In Situ Chemical Oxidation (ISCO)  
*Brant Smith, Director of Technology - Evonik (United States)*

16h10

Management of Invasive Exotic Plant Species (EVEEs) on polluted sites and soils: Innovative valorization through sequestration  
*Sébastien Illovic, Deputy Director - ADEV Environment*

16h30

On Site thermal treatment of mercury and pesticide impacted soils from former chlor alkali plant  
*Jan Haemers, CEO - Haemers Technologies (Belgium)*

16h50

Virtuous approach of industrial wastelands rehabilitation through circular economy, preservation of resources and innovative on-site thermal treatment  
*Laurent Siblot, Sales Development Manager - Ortec Soleo*

17h10 Questions - Answers – Discussions

17h30 End of the Day One



## « Le décret du 6 juillet 2024 relatif à la loi Industrie Verte : les nouvelles dispositions pour la gestion des cessations d'activité et la réhabilitation des sites et sols pollués »



Laurence Lanoy  
Docteur en droit  
Avocat / Spécialiste en droit de l'environnement  
3, rue Antoine Arnauld • 75016 PARIS  
Tél. +33 (0)1 45 20 13 10 •  
Fax : +33 (0)1 45 20 14 59 •  
llanoy@laurencelanoy.com

Faciliter et accélérer les implantations industrielles ainsi que réhabiliter les friches constitue l'un des objectifs majeurs de la loi relative à l'industrie verte du 23 octobre 2023<sup>1</sup> dont le décret du 6 juillet 2024<sup>2</sup> porte diverses mesures d'application. Le décret vise à améliorer la gestion des cessations d'activité et la réhabilitation des fonciers industriels en modifiant la réglementation afin d'accélérer les procédures grâce à la levée de certains freins identifiés par les acteurs concernés.

Le mémoire de réhabilitation doit dorénavant inclure des mesures de gestion de la pollution sur et hors du site, avec une obligation de suppression des pollutions concentrées, sauf dérogation. La procédure de tiers demandeur est simplifiée et accélérée, la rendant ainsi plus attractive. En effet, un tiers peut anticiper la procédure de cessation d'activité en adressant une demande d'accord préalable au préfet avant même la notification de la cessation par l'exploitant. De plus, le tiers demandeur peut se substituer à l'exploitant non seulement pour la réhabilitation mais aussi pour la mise en sécurité. Enfin, la procédure de tiers demandeur est articulée avec la procédure "ASAP" de cessation d'activité, obligeant le tiers demandeur à suivre cette procédure si elle s'appliquait à l'exploitant initial.

Les garanties financières exigées pour la substitution par un tiers demandeur doivent désormais couvrir la totalité des coûts des travaux de mise en sécurité, de réhabilitation et de surveillance, sans possibilité de constitution par tranche, dans l'objectif de sécuriser le processus en cas de défaillance du tiers demandeur.

Enfin, en cas de changement d'usage d'un site ICPE, le maître d'ouvrage doit s'informer sur l'avancement de la procédure de cessation et sur le dernier exploitant. En cas de pollution résiduelle après aménagement, le maître d'ouvrage doit proposer un projet de secteur d'informations sur les sols (SIS) au préfet.

Laurence Lanoy, avocat spécialiste en droit de l'environnement, exposera les nouvelles dispositions pour la gestion des cessations d'activité et la réhabilitation des sites et sols pollués issus du décret du 6 juillet 2024.

\* \* \*

Avocat depuis 1990 et Docteur en droit, Laurence Lanoy a développé une pratique approfondie en droit de l'environnement avant de fonder en 2005 le cabinet Laurence Lanoy Avocats. Elle conseille et assiste des entreprises nationales et internationales, des collectivités publiques et des cabinets d'avocats internationaux notamment en droit de l'environnement et du développement durable, en droit minier et en droit de l'énergie.

**LES ENJEUX DE LA CONSERVATION DE LA MEMOIRE ET DES RESTRICTIONS D'USAGES  
SUR LES SITES ET SOLS POLLUES**

***THE CHALLENGES OF PRESERVING THE MEMORY AND RESTRICTING USE OF CONTAMINATED LAND***

**Carine Le Roy-Gleizes**

Avocate au Barreau de Paris  
UGGC Avocats

**Alice Messin-Roizard**

Avocate au Barreau de Paris  
UGGC Avocats

**Mots clés** : conservation de la mémoire – secteur d'information sur les sols (SIS) – restrictions d'usage – servitude d'utilité publique (SUP) – décret d'application de la loi industrie verte

**Objectif** : analyser les dernières actualités en matière de conservation de la mémoire et de restrictions d'usage des sites et sols pollués au regard des apports du décret d'application de la loi industrie verte ainsi que du projet de guide ministériel sur le sujet

L'amélioration de la gestion des cessations d'activité est l'un des objectifs affichés de la loi industrie verte du 23 octobre 2023 et, avec elle, de son décret d'application du 6 juillet dernier.

Le mémoire de réhabilitation doit comprendre notamment un plan de gestion comportant : les mesures de gestion de la pollution des différents milieux impactés sur le site et, le cas échéant, hors du site ; les travaux à réaliser pour mettre en œuvre les mesures de gestion et le calendrier prévisionnel associé, ainsi que les dispositions prises pour assurer la surveillance et la préservation des intérêts mentionnés par le code de l'environnement, durant les travaux ; et en tant que de besoin, les dispositions prévues à l'issue des travaux pour assurer la surveillance des milieux, la conservation de la mémoire et les éventuelles restrictions d'usages limitant ou interdisant certains aménagements ou constructions, ou certaines utilisations des milieux.

Les restrictions d'usage, qu'il s'agisse de servitudes d'utilité publique (SUP) ou encore de restrictions d'usage entre partie (RUP), sont ainsi un des outils essentiels pour s'assurer de la comptabilité du site avec son usage dans le futur.

Par ailleurs, le code de l'environnement prévoit de nouvelles hypothèses d'institution de secteurs d'information sur les sols (SIS).

Sans pour autant créer de nouveaux outils à disposition des porteurs de projet et des autorités publiques compétentes, les nouveaux textes précités réforment ainsi des aspects importants des outils de conservation de la mémoire ou de restrictions d'usage existants. Un guide sur la conservation de la mémoire et les restrictions d'usage en contexte de sites et sols pollués a par ailleurs été annoncé par la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) et viendra préciser les modalités de mise en œuvre de ces dispositifs.

Cette présentation permettra d'appréhender les outils de conservation de la mémoire et de restrictions d'usage à mobiliser sur un site au vu des milieux impactés et des finalités poursuivies, au

regard notamment des dispositions introduites par le décret d'application de la loi industrie verte et du projet de guide ministériel.

\*\*\*

*Improving the management of the cessation of activity of classified facilities is one of the stated objectives of the Green Industry Act of October 23, 2023, along with its implementing decree of July 6, 2024.*

*In particular, the remediation file must include a management plan comprising: pollution management measures for the various environments impacted on the site and, where applicable, off-site; the description of the work to be carried out to implement the management measures and the associated estimated schedule, as well as the measures taken during the work to ensure the monitoring and preservation of the interests mentioned by the French Environmental Code; and where necessary, the measures planned once the work has been completed to ensure the monitoring, the preservation of memory and any use restrictions limiting or prohibiting certain constructions or uses of the environments.*

*Use restrictions, whether public utility easements (SUP) or restrictions on use between parties (RUP), are thus one of the essential tools for ensuring the site's compatibility with its future use.*

*Besides, the Environmental Code provides for new hypotheses to implement Soil Information Sectors (SIS).*

*Although the texts mentioned above do not introduce new tools for operators and public authorities, they reform important aspects of the existing mechanisms for preserving memory or restricting use of contaminated land. A guide about memory conservation and use restrictions in the context of contaminated land has also been announced by the French Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) and will specify the practical implementation of these measures.*

*This presentation will provide an insight into the tools for memory conservation and use restrictions on a site, in view of the environments impacted and the aims pursued, and in particular with regard to the provisions introduced by the decree implementing the Green Industry Act and the draft ministerial guide.*

\*\*\*

**Carine Le Roy-Gleizes**, avocate au Barreau de Paris, est associée du cabinet UGGC Avocats. Elle intervient notamment en droit de l'environnement industriel.

*Carine Le Roy-Gleizes, attorney at the Paris Bar, is a partner at UGGC Avocats. She focuses her practice on industrial environmental law.*

[c.leroy@uggc.com](mailto:c.leroy@uggc.com)





UGGC AVOCATS

**Alice Messin-Roizard**, avocate au Barreau de Paris, est collaboratrice du cabinet UGGC Avocats. Elle intervient en droit de l'environnement industriel.

*Alice Messin-Roizard, attorney at the Paris Bar, is an associate at UGGC Avocats. She focuses her practice on industrial environmental law.*

[a.messin-roizard@uggc.com](mailto:a.messin-roizard@uggc.com)





UGGC AVOCATS

**RECONVERSION DES FRICHES INDUSTRIELLES VERS UN USAGE DE  
RENATURATION : OPPORTUNITE OU MIRAGE ?**

***CONVERTING BROWNFIELD SITES INTO NATURAL SITES: OPPORTUNITY OR  
ILLUSION?***

**Carine Le Roy-Gleizes**

Avocate au Barreau de Paris  
UGGC Avocats

**Antoine Juquin**

Avocat au Barreau de Paris  
UGGC Avocats

**Mots clés** : renaturation – friches industrielles – zéro artificialisation nette

**Objectif** : étudier les perspectives de transformation des friches industrielles en sites naturels, au regard des enjeux de restauration et de renaturation et de création de sites de compensation nécessaires à la poursuite du développement industriel

La réduction des réserves foncières à l'échelle du territoire national fait peser sur les terres disponibles une pression accrue. Elle résulte en partie de la nécessité de réaliser deux objectifs majeurs : maintenir ou recréer davantage d'espaces naturels et accorder, en même temps, suffisamment d'espaces aux entreprises pour assurer le développement industriel de la France.

La poursuite de ces deux objectifs concurrents met les pouvoirs publics face une problématique inédite : celle de devoir concilier ces objectifs sans compromettre la réussite de l'un ou l'autre, voire des deux.

L'une des solutions réside dans la valorisation des réserves foncières substantielles et inutilisées que sont les friches industrielles. A elles seules, ces friches représentent une surface totale comprise entre 90 000 et 150 000 hectares. Si, depuis quelques temps déjà, les friches industrielles connaissent un regain d'intérêt pour leur potentiel de réhabilitation à des fins industrielles, leur reconversion pour un usage de renaturation est une alternative dont le potentiel mérite d'être considéré.

Transformer les friches industrielles pour en faire un espace de renaturation pourrait ainsi permettre d'atteindre l'objectif Zéro artificialisation nette (ZAN) d'ici 2050. Cette opportunité de transformation constitue d'ailleurs l'une des mesures de restauration de la nature identifiée par le Règlement européen éponyme et s'inscrit en synergie avec les enjeux de la proposition de Directive sur la surveillance et la résilience des sols.

Cette intervention a pour but de présenter le contexte, les avantages et les limites du cadre normatif existant, permettant la reconversion de friches industrielles vers un usage de renaturation, ainsi que les outils récemment déployés pour développer le potentiel de mutabilité des friches.

\*\*\*

The nationwide reduction in real estate reserves is putting increasing pressure on available lands. This is partly due to the need to achieve two major objectives: maintain or recreate more natural areas and, at the same time, provide sufficient space for businesses to ensure France's industrial development.

The pursuit of these two competing objectives presents public authorities with an unprecedented challenge: having to reconcile these objectives without compromising the success of either or both of them.

One solution lies in developing the substantial unused real estate reserves represented by brownfield sites. Brownfield sites alone represent a total surface area of between 90,000 and 150,000 hectares.

While brownfield sites have been attracting renewed interest in recent years for their potential to be rehabilitated for industrial use, their conversion for renaturation purposes is an alternative that deserves to be considered.

Converting brownfield sites for renaturation could help to achieve the goal of Zero Net Artificialization (ZAN) by 2050. This transformation opportunity is also one of the nature restoration measures identified by the European Regulation on this matter, and would be in synergy with the objectives of the proposed Directive on soil monitoring and resilience.

The aim of this presentation is to set out the background, benefits and limitations of the current regulatory framework for brownfield redevelopment, as well as the tools that have recently been deployed to unlock the potential of brownfield redevelopment.

**Carine Le Roy-Gleizes**, avocate au Barreau de Paris, est associée du cabinet UGGC Avocats. Elle intervient en droit de l'environnement industriel.

*Carine Le Roy-Gleizes, attorney at the Paris Bar, is a partner at UGGC Avocats. She focuses her practice on industrial environmental law.*

[c.leroy@uggc.com](mailto:c.leroy@uggc.com)



**Antoine Juquin**, avocat au Barreau de Paris, est collaborateur du cabinet UGGC Avocats. Il intervient en droit de l'environnement industriel.

*Antoine Juquin, attorney at the Paris Bar, is an associate at UGGC Avocats. He focuses his practice on industrial environmental law.*

[a.juquin@uggc.com](mailto:a.juquin@uggc.com)



## INTERSOL 2025

-

### « PFAS et sites pollués : anticiper les défis juridiques d'une pollution émergente »

**Pauline Leddet-Troadec**

Avocate au Barreau de Paris

Associée Droit de l'environnement

Latournerie Wolfrom Avocats

**Mots clés** : PFAS – POLLUTION – DROIT DE L'ENVIRONNEMENT – RESPONSABILITÉ JURIDIQUE – CONTENTIEUX – RÉGLEMENTATION

**Objectif** : Comprendre et anticiper les enjeux juridiques liés à l'intégration des pollutions aux PFAS.

Les substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS), connues sous le nom de « *polluants éternels* », sont au cœur des préoccupations environnementales en raison de leur extrême persistance et de leurs effets délétères sur la santé humaine et les écosystèmes. Leur régulation progressive au niveau européen et national illustre la volonté croissante des autorités d'encadrer et de limiter leur impact. Dans ce contexte, l'évolution du cadre juridique (i) constitue un enjeu majeur pour les industriels et les collectivités confrontés aux obligations de mise en conformité et aux conséquences des contentieux émergents (ii).

#### I) L'évolution du cadre juridique et réglementaire

##### Réglementation européenne et internationale

Au niveau européen, plusieurs instruments ont été adoptés pour encadrer les PFAS. Le règlement REACH soumet certaines de ces substances à des restrictions, bien que les polymères restent exemptés à ce jour. La directive sur l'eau de 2013 établit des normes de qualité environnementale pour le PFOS, tandis que la directive EDCH de 2020 impose des limites strictes aux PFAS dans les eaux potables, applicables dès 2026. Par ailleurs, le règlement POP interdit depuis 2020 l'usage du PFOA et du PFHxS. La stratégie chimique européenne vise quant à elle à restreindre leur utilisation sauf pour des usages considérés comme essentiels.

##### Réglementation nationale : un renforcement progressif

En France, la réglementation applicable aux PFAS connaît une évolution récente. Depuis le 17 août 2022, certaines installations de traitement de déchets relevant du régime de l'autorisation et de la directive relative aux émissions industrielles (dite IED) sont soumises à une obligation de surveillance semestrielle du PFOS et du PFOA dans leurs effluents (arrêté du 17 décembre 2019). L'arrêté intégré impose, depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2023, une limite stricte pour les rejets aqueux de PFOS provenant des établissements concernés. Plus récemment, l'arrêté ministériel du 20 juin 2023 a étendu les exigences en matière de surveillance à plusieurs milliers d'établissements industriels. Ces derniers doivent désormais rechercher la présence éventuelle de PFAS dans leurs rejets aqueux afin de mieux quantifier leur contribution aux pollutions des cours d'eau.

L'évolution majeure reste cependant l'adoption de la loi du 20 février 2025 visant à lutter contre les risques liés aux PFAS. Ce texte instaure une interdiction progressive de la fabrication, de l'importation et de la mise sur le marché des PFAS dans plusieurs secteurs industriels, notamment les cosmétiques et les textiles, à compter du 1er janvier 2026. Une interdiction plus large sera effective d'ici 2030, sauf pour des usages essentiels. La loi impose également un contrôle sanitaire renforcé de l'eau, la création d'une carte nationale des sites pollués et un mécanisme de redevance spécifique sur les rejets industriels de PFAS. De plus, une trajectoire de réduction progressive des rejets industriels vise une élimination complète de ces substances dans un délai de cinq ans.

## II) Un risque juridique et financier majeur pour les entreprises

Les réglementations sur les PFAS s'accompagnent d'une intensification des contentieux, exposant les entreprises à des sanctions administratives, civiles et pénales. En France, l'affaire de Pierre-Bénite marque un tournant avec des arrêtés préfectoraux obligeant Arkema et Daikin à surveiller et réduire leurs rejets de PFAS, jusqu'à une interdiction totale pour Arkema d'ici fin 2024. Sur le plan judiciaire, la Métropole de Lyon a engagé un référé-expertise pour établir la responsabilité des industriels dans la pollution des eaux, tandis qu'une enquête pénale vise des faits de mise en danger de la vie d'autrui et d'écocide, donnant lieu à des perquisitions et des investigations en cours.

Parallèlement, une action de groupe inédite pourrait voir le jour. La CGT, qui a récemment créé un collectif PFAS, envisage des recours collectifs au nom des salariés exposés, ouvrant la voie à une nouvelle forme de contentieux.

À l'international, les contentieux se multiplient, notamment aux États-Unis, où des géants de l'industrie ont conclu des accords financiers historiques pour compenser les dommages causés par la pollution aux PFAS. 3M et DuPont ont conclu des règlements respectivement estimés entre 10,5 et 12,5 milliards de dollars et 1,185 milliard de dollars. En Italie, la contamination aux PFAS a conduit à l'ouverture de procès impliquant dirigeants et industriels.

Le coût de la dépollution est vertigineux. En Europe, il est estimé entre 95 milliards et 2 000 milliards d'euros sur vingt ans, sans compter l'impact sanitaire et environnemental.

**Pauline Leddet-Troadec**

p.leddet-troadec@latournerie-  
wolfrom.com

T : +33 1 56 59 74 74

M : +33 7 89 47 91 06



164 rue du Faubourg Saint-Honoré

75008 Paris

# L'évaluation des potentialités écologiques des sols pour l'aménagement durable et la réhabilitation des sites dégradés

Quentin VINCENT

Directeur Technique du pôle Sols Vivants – EODD ingénieurs conseils  
[g.vincent@eodd.fr](mailto:g.vincent@eodd.fr) - 06 66 38 67 34

## MOTS CLES :

Diagnostic agro-pédo-biologique, Fonctions écologiques, Réhabilitation, Trame brune, Aménagement durable, Sols vivants.

## RESUME :

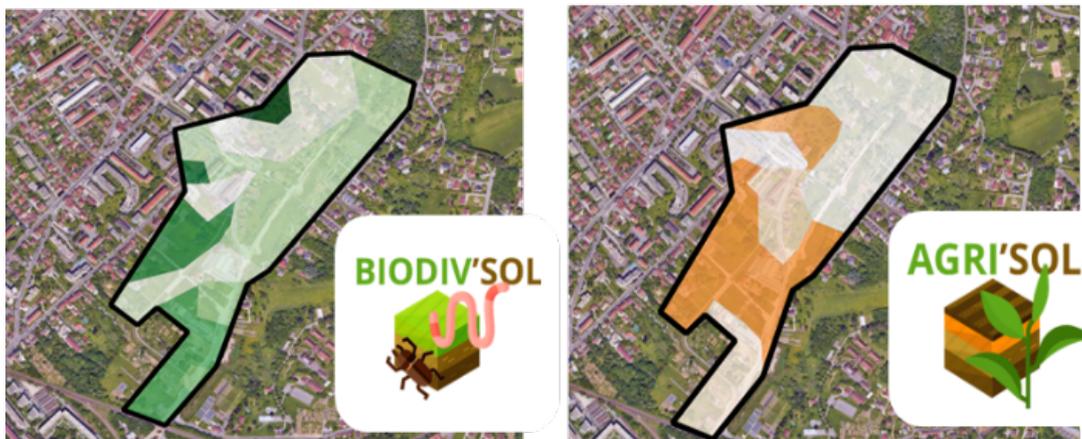
Dans le contexte actuel d'aménagement du territoire et de réhabilitation des **sites et sols dégradés**, les **fonctions écologiques** des sols restent largement sous-estimées, par manque d'intégration des métiers de l'écologie des sols dans ce type de projet. Pourtant, ces fonctions comme la fertilité, le stockage du carbone, l'accueil de la biodiversité et la régulation hydrique sont essentielles pour garantir la **résilience des écosystèmes terrestres** et la réussite des projets sur le long terme. Leur évaluation demeure complexe en raison de l'absence de méthodologies harmonisées, de référentiels adaptés et de la forte hétérogénéité des sols anthropisés.

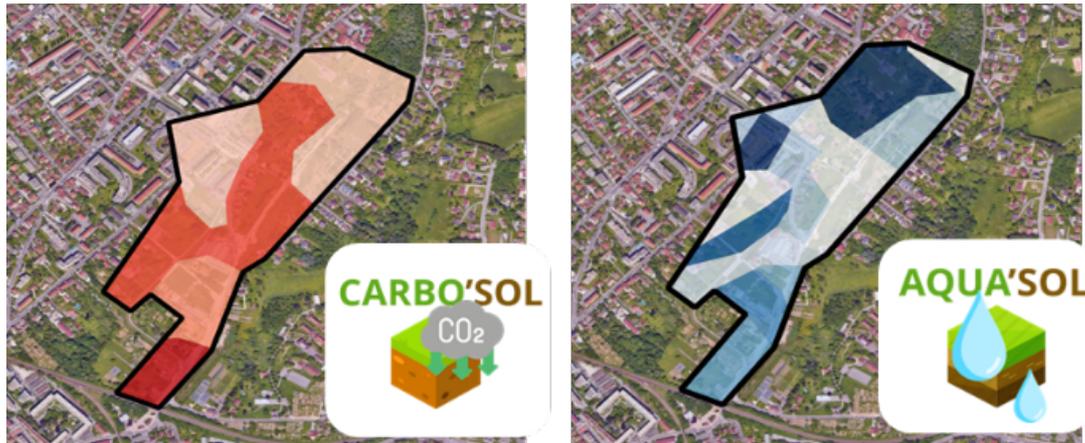
Face à ces défis, à l'échelle du site, seul un **diagnostic agro-pédo-biologique** que nous avons adapté aux sols fortement anthropisés, permet d'identifier le potentiel des sols et d'apporter des réponses concrètes à trois enjeux majeurs :

### 1. Optimiser l'aménagement du site selon ses potentialités écologiques

Nous avons développé des **outils d'aide à la décision** qui s'appuient sur les diagnostics agro-pédo-biologiques :

- **Agri'Sol** évalue la fertilité des sols (*via* l'ancrage racinaire, nutriments et cycle des éléments, équilibre des nutriments, capacité de stockage des nutriments et capacité de rétention en eau).
- **Carbo'Sol** mesure le stock de carbone et identifie le potentiel de séquestration.
- **Aqua'Sol** estime la capacité d'infiltration et de rétention en eau des sols.
- **Biodiv'Sol** analyse le potentiel d'accueil des organismes vivants du sol (macrofaune dont les lombriciens, mésofaune dont les collemboles et les microorganismes).





*Illustration cartographique des potentiels écologiques des sols pour la réhabilitation de sols dégradés*

## 2. Valoriser les terres dans une stratégie d'économie circulaire

L'outil Agri'Sol permet également d'évaluer la **compatibilité des terres** pour leur réutilisation dans la construction de sols vivants (premier, deuxième ou troisième horizon), assurant ainsi une gestion durable et optimisée des ressources.

## 3. Intégrer les projets dans des continuités écologiques

La **trame brune**, inspirée de la Trame Verte et Bleue, assure une continuité écologique pour la biodiversité des sols. Grâce à l'outil Biodiv'Sol et basé sur les traits et préférences écologiques de la faune du sol, guide l'intégration du site réhabilité dans cette trame, favorisant ainsi une **renaturation durable** et une **optimisation opérationnelle des corridors écologiques**.

Cette approche innovante mobilise des compétences en **pédologie, biologie, écologie et de la planification**, garantissant des projets d'aménagement et de réhabilitation plus **résilients** et **vertueux**. Un exemple concret illustrera ces démarches : la réhabilitation d'un **ancien site militaire à Châlons-en-Champagne**. Les potentialités écologiques des sols, la qualité des terres pour leur revalorisation et l'intégration dans les continuités écologiques sont étudiées et appliquées, démontrant l'efficacité d'une approche multidisciplinaire.

**CO2POL – EMPREINTE CARBONE DES PROJETS ET CHANTIERS DE DEPOLLUTION – ETABLIR UN REFERENTIEL NATIONAL SUR LA METHODOLOGIE DES CALCULS D’EMISSION ET DONNER DES CHIFFRES CLES**

**CO2POL – CARBON FOOTPRINT OF DEPOLLUTION PROJECTS AND REMEDIATION SITES – ESTABLISH NATIONAL REFERENCE STANDARD OF THE EMISSION CALCULATIONS’ METHODOLOGY AND PROVIDE KEY FIGURES**

**Sébastien Kaskassian<sup>1</sup>, Baptiste Fillebeen<sup>1</sup>, Niama El Kari<sup>1</sup>, Christophe Chene<sup>2</sup>, Louise Dessertine<sup>2</sup>, Clotilde Johansson<sup>2</sup>,**

<sup>1</sup>*TAUW France, 91-93 Bd du Parc d'Artillerie BAT 83, 69007 Lyon*

<sup>2</sup>*ORTEC SOLEO, 8 ter avenue du Docteur Schweitzer, 69330 Meyzieu*

**Présenté par :** Clotilde Johansson – ORTEC SOLEO – [clotilde.johansson@ortec.fr](mailto:clotilde.johansson@ortec.fr)

**Co-présenté par :** Sébastien Kaskassian – TAUW France – [s.kaskassian@tauw.com](mailto:s.kaskassian@tauw.com)

**Caractère innovant :** Définition d’un périmètre uniformisé pour le calcul des bilans carbone de chantiers SSP, et mise en place d’une base de données de références des émissions par type de chantier de dépollution, basée sur des cas réels.

**Mots clés :** CO<sub>2</sub>, émissions de Gaz à Effet de Serre (GES), bilan carbone, empreinte carbone.

**Objectifs :** L’objectif principal du projet CO<sub>2</sub>POL est de mettre à disposition des données publiques qui permettront aux acteurs du métier et à leurs clients de prendre conscience de l’impact des projets de dépollution de sols et d’eaux souterraines en termes d’émissions de GES de manière à intégrer ce critère de choix au stade de la conception du projet.

Le projet n’a pas pour objet de créer ou de mettre en valeur un outil de calcul, mais plutôt de définir une méthodologie et un périmètre reconnu par l’ensemble de la profession SSP pour réaliser les bilans d’émissions de GES sur des hypothèses communes.

**Abstract :**

En 2015 lors de la COP 21, les parties à la convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) ont fixé un objectif de 1,5°C à 2°C d’augmentation de température moyenne mondiale en 2100 par rapport à l’époque préindustrielle. Le Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat (GIEC) précise en outre, que le respect d’un réchauffement à +1,5 °C implique de réduire les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> de 45 % en 2030 par rapport à 2010 et d’atteindre la neutralité carbone à l’horizon 2050.

Pour répondre aux engagements pris lors de la COP 21, la France s’appuie sur une décarbonation quasi totale des activités économiques. Les émissions résiduelles seront compensées par l’absorption du secteur de l’utilisation des terres, changements d’affectation des terres et foresterie (UTCATF) et les

captures/stockages technologiques de CO<sub>2</sub>. La Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC)<sup>1</sup> révisée en 2019 décrit la progression de l'atténuation des émissions dans les secteurs d'activités pour atteindre la neutralité carbone. Des actions structurantes d'envergure sont nécessaires afin d'atteindre les objectifs fixés par la SNBC, dont la réussite dépend de la mobilisation de tous les acteurs de la société (élus, entreprises, citoyens).

L'Union des Professionnels de la Dépollution des Sites (UPDS) s'est engagée contre le changement climatique, au travers d'une charte reprenant dix pratiques vertueuses pour le climat<sup>2</sup> dont les cinq suivantes sont en lien avec des chantiers de dépollution sobres en carbone :

- Organiser les chantiers de façon à limiter les émissions de gaz à effet de serre (GES) en privilégiant les traitements *in situ* et sur site,
- Utiliser de préférence des engins (pelles mécaniques, chargeurs, camions, groupes électrogènes, cribles...) fonctionnant grâce à des énergies faiblement émettrices de GES (gaz naturel, électricité...),
- Promouvoir la valorisation de terres excavées afin de limiter l'utilisation de ressources naturelles,
- Privilégier les circuits courts et les sous-traitants implantés à proximité des chantiers,
- Utiliser de préférence des matériaux recyclés (remblaiement des fouilles, tuyaux...).

Il existe donc une **demande générale forte** de la profession et des décideurs (industriels, administrations), en lien avec les politiques publiques de réduction des émissions de GES et de l'évolution réglementaire qui en découle, de **pouvoir justifier des techniques de dépollution incluant l'empreinte environnementale** au travers des outils méthodologiques propres au secteur des sites et sols pollués (bilan coûts-avantages, plan de conception de travaux, travaux, etc.).

La « Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués »<sup>3</sup> requiert qu'un bilan « coûts-avantages » (BCA) soit mené dans le cadre de la réalisation d'un plan de gestion, afin de sélectionner au moins deux scénarios de gestion. Ce BCA consiste à produire une étude comportant des éléments factuels et détaillés de comparaison de chaque scénario de gestion pertinent sur les mêmes critères de comparaison, intégrant l'ensemble des coûts y compris les coûts annexes, tant sur le plan sanitaire qu'environnemental.

Devant ce **besoin de déterminer les bilans d'émissions de GES dans la profession des SSP**, quelques études se sont intéressées au calcul des émissions de CO<sub>2</sub> et GES sur certains chantiers, et différents outils sont développés en internes par chaque acteur du métier. Il devient **primordial d'harmoniser les critères et le périmètre d'études, pour une méthodologie fiable à échelle nationale**, et d'établir un état des lieux des émissions de chaque technique de dépollution des sols et eaux souterraines, basé sur des cas réels.

L'objectif du projet est de fournir un cadre méthodologique et des données issues de cas réels pour rendre opérationnelle l'estimation de l'empreinte carbone de chaque technique de dépollution, pour les principales étapes des études et travaux de gestion des sites et sols pollués.

---

<sup>1</sup> Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, Ministère de la Transition énergétique – Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) - 21 juillet 2022 - <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>

<sup>2</sup> UPDS – Mars 2021 – Charte UPDS. Lutte contre le changement climatique. 1 page.

<sup>3</sup> Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, Direction générale de la prévention des risques – Bureau du sol et du sous-sol – Avril 2017 – Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués. 128 pages.

Le projet CO<sub>2</sub>POL est alimenté et soutenu par un comité d'experts issus du domaine des Sites et sols pollués, comprenant des sociétés de travaux, des bureaux d'études, des maîtres d'Ouvrages et des Institutionnels. Les cas d'études seront issus de ce comité d'expert via des Retours d'Expériences (REX), ainsi que la définition de la méthodologie, des choix des paramètres et hypothèses de calcul.

Dans un premier temps, les paramètres, critères, périmètres et choix seront définis pour établir une méthodologie de calcul commune. Les facteurs d'émission choisis pour les calculs seront issus de la base de données CARBONE de l'ADEME, mais également d'autres sources clairement identifiées et justifiées selon le besoin. Cette étude permettra donc également d'identifier les potentielles lacunes dans les sources.

Puis, le bilan carbone sera réalisé selon le périmètre prédéfini sur 60 chantiers, sélectionnés parmi des cas réels de chantiers clôturés, par lots de 3 à 5 chantiers pour chaque technique ciblée. Soit : 7 techniques *in-situ* parmi les plus réalisées en France (venting, sparging, écrémage, ISCO, ISCR, désorption thermique, traitement par bio aérobie/anaérobie...), 3 techniques on-site (biopile, désorption thermique, landfarming...), 4 techniques hors-site (excavations avec ou sans tente, criblage, blindage...) et autres cas d'intérêt. Si possible, différentes tailles de chantiers seront sélectionnées pour une même technique.

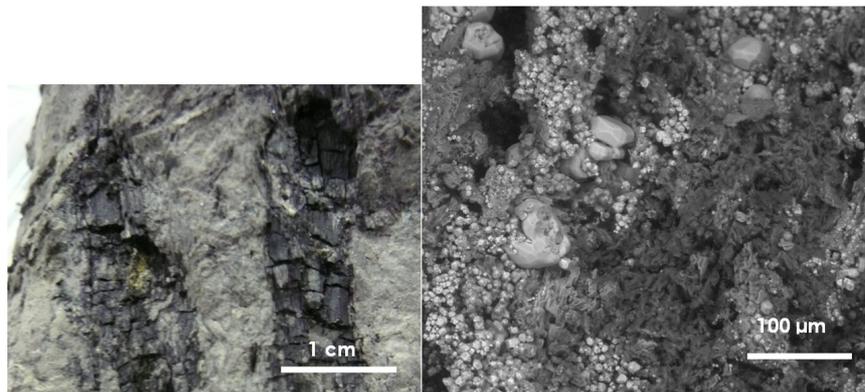
Le projet CO<sub>2</sub>POL a démarré en décembre 2023. Au jour de cette candidature, le travail de bibliographie est terminé et a permis de mettre en lumière plusieurs questions critiques concernant le périmètre de calcul des bilans d'émissions de GES. La recherche bibliographique montre également l'absence de consensus national sur cette méthodologie de calcul, pourtant nécessaire dans le contexte d'une mesure, estimation et baisse des émissions à l'horizon 2050. Au jour du séminaire, la méthodologie définie par le comité d'expert pourra être présentée, ainsi que les premiers résultats des calculs.

## The problem of pyrite-rich soils in underground works

Duc Myriam, chargée de recherches à GERS/SRO,  
Univ. Gustave Eiffel, 14-20 bd Newton, 77447 Marne-la-Vallée, France

Agnès Cherrey, chargée d'études et de recherche au CETU (Centre d'Etudes des Tunnels)  
Av. François Mitterrand, 69500 Bron, France

**Summary :** *The use of tunnel boring machines for excavating underground structures has brought to light a risk associated with the transformation of pyrite in soil during the transportation and surface storage steps. Indeed the contact with oxygen in air at the surface leads to the release of sulfates and a decrease in the pH of the surrounding water. To manage the problem induced by pyritic soil found in subterranean tunnels beneath the Paris basin, adequate approach has emerged: a streamlined identification technique, setting benchmarks, an execution strategy, and even choice-making diagrams. The present speech proposes to expose and discuss the following points: after the synthetic description of the mechanisms leading to the transformation of pyrite during excavation which may induce harmful potential consequences, the regulations and methods for managing the pyrite-containing soil is examined. Feedback on various strategies for managing such soils, notably abroad, are exposed. From technical point of view, a novel lab test is described based on the usual standard used to calculate the Neutralizing/Acidogenic Potential (NP/AP) of pyritic soil. The novelty lies in the simultaneous assessment of the quantities of total sulfur, sulfate, carbonate, and organic carbon content. Using a single tool (a Carbon/Sulphur analyzer), the method could be implemented on site in mobile lab to supply rapid measurements. Finally, the kinetic tests that complete the NP/AP ratio measurement are discussed.*



Macro and micro photo of pyrite in the “Fausses Glaises” geological formation (from Paris)

The management of excavated soils in underground works can be more or less impacted by the excavation method, especially the mechanical one. Logistical challenges and the processing of excavation become

complex when reaching specific deep geological formations usually unaffected by surface work. In deep strata, sulfide-rich phases such as pyrite  $\text{FeS}_2$  are commonly found in the sedimentary materials of the Parisian Basin and the tunnel boring machines often come across this “geochemical anomaly” during excavation. However, the unexpected presence of pyrite in excavated materials could harm the environment and human health if it is not managed properly. To reduce this risk, CETU that is a government technical service and the University Gustave Eiffel have been working together on the technical, regulatory and organizational aspects considering the pyrite-containing soils. Indeed, the regulatory frameworks for inert waste are not totally adequate to management properly the excavated soil containing pyrite.

The presence of pyrite in some formations in the Paris Basin, as well as the evolution of pyrite particles during excavation and their potential impact during surface storage, were known for a long time, but the details of how this mineral evolves over time keep on needing to be clarified in the light of the environmental conditions to which it is subjected (activating and inhibiting effect) especially on storage sites.

In light of regulatory requirements, the inherent qualities and management options for land contaminated with pyrite have been examined using approaches implemented in different countries, such as Quebec, Germany, and France. The proposed actions go beyond a simple characterization process and include specific transportation and implementation techniques on sites, such as compaction to reduce water and air permeability, and the application of appropriate carbonate treatments. These measures should have to limit the pyrite evolution from extraction to storage.

In addition, the University Gustave Eiffel studied samples from the core libraries of various projects of tunneling in Paris region. These samples were used for laboratory characterization tests and better understand the behavior of excavated material containing pyrite. Tests combined X-ray diffraction (XRD) to reveal the presence of gypsum, carbonates, and pyrite (or other sulfides), and scanning electron microscopy to examine the various forms of sulfides (pyrites) that are commonly found in association with lignin (organic carbon). Quantitatively, an analysis of the carbon and sulfur content was conducted to quantify sulfides, sulfates, and carbonates, and to calculate the NP/AP ratio as imposed by the NF EN 15875 standard (characterization of the acidifying nature of soils). To gain time of measurement, a novel approach was developed at University Gustave Eiffel, based on a carbon/sulfur analyzer, equipment able to supply simultaneously the various parameters required for NP/AP calculation. This procedure simplifies the excavated soil diagnostic, allowing for a prompt conclusion within 3 days or less (provided that a suitable soil sample has been properly collected and stocked). The accuracy of the method has been demonstrated through comparisons with results from accredited laboratories.

Finally, some rapid kinetic tests based on the procedure described in the document FD CEN/TR 16 363 were conducted on two soil sample from Paris Basin (containing higher and lower carbonates content). These tests show that not all sulfides oxidize systematically when subjected to alternating drying/wetting cycles with water. The alternating periods do not fully convert all the sulfides into sulfates, but only a part of them. The passivation of the pyrite surfaces after a certain time explains such phenomenon, which prevents further oxidation. Conversion values of less than 30% have been obtained with a procedure considered the "worst condition", but doubts may remain about the values obtained on site. Indeed, the kinetic test outcomes are influenced by the applied protocol, such as how the soil is placed in the cell and the exposure conditions (exposed surface, soil compactness, temperature, vacuum pump drainage speed, etc.)

In summary, this feedback highlights the importance to manage carefully the pyrite-containing excavated materials. The measures to be taken in response to sulfur in soil and the geology of the excavated soil must be tailored to the circumstances of each case.

## **Advancing PFAS Soil Remediation with Energy Efficient Destruction Solution: From Lab Success to On-Site Optimization**

Antoine Brison, Environmental Process Engineer - Oxyle (Swiss)

The urgent need to address per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) contamination in soil remains a critical challenge for environmental preservation and human health. These persistent chemicals infiltrate ecosystems, water sources, the food chain, posing significant risks to human health, including developmental, immune, and carcinogenic effects. Conventional remediation methods, such as activated carbon and ion exchange resins, are limited in their effectiveness. These methods do not degrade PFAS but rather, extract them. They generate secondary PFAS-laden waste, which is often incinerated—releasing pollutants into the atmosphere—or landfilled, where it can leach back into the environment, perpetuating a cycle of contamination and creating financial and operational burdens for operators.

Oxyle's catalytic destruction technology represents a breakthrough in PFAS remediation efforts, offering a genuinely eliminative, waste-free solution. Activated by turbulence in the water, the catalyst breaks down and mineralizes broad-spectra PFAS (from ultra short to long-chain) into harmless by-products like fluoride ions, sulfate ions, and carbon dioxide. The technology achieves high broad-spectra PFAS elimination rates (99%+), with energy efficiency as low as 1 kWh/m<sup>3</sup>. This approach provides an effective solution for eliminating PFAS from contaminated soil wash water while also minimizing operational costs at scale.

In collaboration with a water technology service provider, the catalytic destruction technology was successfully applied to soil wash water with PFAS contamination exceeding 15,000 ng/L. Initial lab results demonstrated a reduction to 31 ng/L within a standard treatment cycle.

Building on these findings, an on-site pilot was conducted in Belgium to validate and optimize a comprehensive, and modular treatment solution for the soil-wash water. The pilot investigated how to best integrate the PFAS destruction solution into local water cycles and confirmed the performance of Oxyle technology for PFAS soil remediation challenges.

This presentation will summarize the findings from both the initial trials and the subsequent pilot study, highlighting advancements in PFAS destruction solutions and their implications for addressing persistent soil contamination.

-----

### **Répondre aux besoins d'assainissement des sols contenant des PFAS grâce à une solution de destruction économe en énergie : Du succès en laboratoire à l'optimisation sur site**

Antoine Brison, Ingénieur procédés environnementaux - Oxyle (Suisse)

L'assainissement des sols contaminés par les substances per- et polyfluoroalkyles (PFAS) reste un défi majeur pour la préservation de l'environnement et la santé humaine. Ces molécules chimiques persistantes s'infiltrent dans les sols, les sources d'eau, les écosystèmes et la chaîne alimentaire, et présentent des risques importants pour la santé humaine, notamment des retards de développement, des risques immunitaires et des cancers. Les méthodes d'assainissement conventionnelles, telles que le charbon actif et les résines échangeuses d'ions, sont d'une efficacité limitée. Ces méthodes ne détruisent pas les PFAS, mais les extraient. Elles génèrent des déchets chargés en PFAS, qui sont

souvent incinérés - libérant des polluants dans l'atmosphère - ou mis en décharge, où ils peuvent s'infiltrer à nouveau dans l'environnement, perpétuant ainsi un cycle de contamination et créant des charges financières et opérationnelles pour les opérateurs.

La technologie de destruction catalytique d'Oxyle représente une percée dans les efforts de traitement des PFAS, offrant une solution d'élimination véritable et sans déchets nocifs. Activé par les turbulences de l'eau, le catalyseur décompose et minéralise les PFAS à large spectre (de la chaîne ultra courte à la chaîne longue) en sous-produits inoffensifs tels que les ions fluorure, les ions sulfate et le dioxyde de carbone. Cette technologie permet d'obtenir des taux élevés d'élimination des PFAS à large spectre (99 %+), avec un rendement énergétique jusqu'à 1 kWh/m<sup>3</sup>. Cette approche constitue une solution efficace pour éliminer les PFAS des sols contaminés, des eaux de lavage et des eaux usées.

En collaboration avec un fournisseur d'assainissement des sols et traitement de l'eau, la technologie d'Oxyle a été appliquée avec succès à l'eau de lavage des sols dont la contamination par les PFAS dépassait 15 000 ng/L. Les premiers résultats de laboratoire ont montré une réduction à 31 ng/L au cours d'un cycle de traitement standard.

Sur la base de ces résultats, un projet pilote a été mené sur site en Belgique afin de valider et d'optimiser une solution de traitement complète et modulaire pour les eaux de lavage des sols. Ce pilote a examiné la meilleure façon d'intégrer la solution de destruction des PFAS dans les cycles locaux de l'eau et a confirmé la performance de la technologie Oxyle pour les défis de remédiation des PFAS dans le sol.

Cette présentation résumera les résultats des essais en laboratoire et de l'étude pilote sur site, en soulignant les avancées dans les solutions de destruction des PFAS et leurs implications dans le traitement de la contamination persistante des sols.

# FRICHECO<sup>1</sup> ET APPLLEX<sup>2</sup> : OPÉRATIONNALISER UN "PETIT CYCLE DES TERRES" À MARSEILLE

Une recherche-action pour prendre soin des sols vivants à l'échelle du bassin versant des Aygaldes

Hugo Maurer<sup>1\*</sup>, Catherine Keller<sup>2</sup>, Philippe Bataillard<sup>3</sup>, Jean-Louis Lambeaux<sup>4</sup>

<sup>1</sup> : IMBE / LIEU, Université Aix-Marseille & Neo-Eco, 19 Quai de la Rive Neuve 13007 Marseille, [hmaurer@neo-eco.fr](mailto:hmaurer@neo-eco.fr) (+33 6 33 47 47 36)

<sup>2</sup> : CEREGE, CNRS, Technopôle de l'Arbois-Méditerranée, BP80, 13545 Aix-en-Provence, [keller@cerege.fr](mailto:keller@cerege.fr)

<sup>3</sup> : BRGM (Direction Nationale), 3 Av. Claude Guillemin, 45100 Orléans, [p.bataillard@brgm.fr](mailto:p.bataillard@brgm.fr)

<sup>4</sup> : BRGM (Direction régionale Provence-Alpes-Côte d'Azur), 117 av de Luminy BP 168 13276 Marseille, [jl.lambeaux@brgm.fr](mailto:jl.lambeaux@brgm.fr)

## Résumé :

Territoire méditerranéen par excellence, la rade de Marseille centralise de nombreux enjeux liés à la transition environnementale et sociétale. La proximité directe de grands centres urbains, de sites industriels, certes pourvoyeurs d'emplois, mais aussi émetteurs de polluants, et de parcs naturels protégés, en font un territoire particulièrement concerné par les conflits d'usages dès lors qu'un projet de renouvellement urbain est évoqué [1]. Cette tension grandissante entre la finitude écologique de la Terre et un système productif construit sur l'idée d'abondance nous pousse à réinterroger nos sociétés, et la manière dont elles régulent leurs relations à l'environnement [2]. La tâche du scientifique dans ce processus de questionnement est essentielle, notamment pour accompagner les processus de décision complexes qui en découlent et construire les chambres de résonances permettant d'ouvrir une discussion entre le politique, le social et l'environnement [3].

Pour dépasser ces paradoxes, il existe un effort collectif (mais pas encore coordonné) de la part des institutions locales pour renforcer les connaissances et les innovations organisationnelles et techniques, sur le sujet spécifique des sols et du végétal en milieu urbain. Afin de développer des outils accessibles et adaptés aux usages des institutions, un processus de recherche-action a été déployé avec un collectif de chercheurs interdisciplinaire pour activer une économie circulaire des terres, avec une approche holistique et multiéchelles appelée « petit cycle des terres » sur le territoire marseillais. Sa portée opérationnelle tient au fait que les résultats alimenteront les arènes où s'élaborent les décisions des aménageurs portant des projets de réhabilitation écologique. Et pour engager un travail de fond avec l'ensemble des sphères du socio-écosystème étudié, un Living Lab est en cours de structuration avec un premier pilote de grande ampleur, réalisé avec un partenaire industriel et un aménageur avec le consortium de recherche FrichEco. Au total, ce sont 11 formulations, 33 fosses, pour 600 tonnes de matériaux valorisés qui ont été mises en œuvre en 2 jours. Ce temps intègre : la massification des gisements, leur préparation, la réalisation des formulations et la mise en œuvre finale. Cette cadence soutenue a permis de prouver la faisabilité opérationnelle de produire des sols construits avec des techniques industrielles, en flux tendu et avec des ressources devant finir en enfouissement. De fait, les articulations entre le Living Lab et le programme FrichEco sont particulièrement intriquées, afin de transférer les résultats scientifiques dans le processus décisionnel. Ce Living Lab devrait permettre d'accélérer la coordination des acteurs locaux, des scientifiques aux décideurs en passant par la société civile, afin que le sujet des « sols vivants » puisse émerger dans le politique.

---

<sup>1</sup> Le projet de recherche FrichEco (*Refonctionnalisation des friches dans une logique d'économie circulaire en circuit courts*) est lauréat de l'APR GESIPOL 2023 et réunit l'EPA Euroméditerranée, le CEREGE, le BRGM et Neo-Eco.

<sup>2</sup> Le projet de recherche APPLLEX (*APPortS des laboratoires vivants (Living Lab) dans l'étude des EXternalités positives des filières de bioéconomie pour la création de valeur sur les territoires dégradés*) est lauréat de l'APR GRAINE 2024 et réunit l'Université Aix-Marseille, l'Université de Lorraine, le BRGM et Neo-Eco, autour de partenaires institutionnels et associatifs : Conseil Régional Sud, la Métropole Aix-Marseille-Provence, la Ville de Marseille, le Grand Port Maritime de Marseille, l'aménageurs SOLEAM, la Cité de l'Agriculture et le Collectif Sols Vivants Terres fertiles.

## Introduction

Le projet FrichEco s'ancre sur le socio-écosystème du bassin-versant des Aygalades, dont les caractéristiques vont fortement évoluer avec l'aménagement du Parc des Aygalades, une opération de développement d'un parc urbain de 19 ha incluant la renaturation du ruisseau des Aygalades et la production de biomasse (végétation urbaine et agriculture urbaine), sur une friche industrielle (ancien faisceau ferré de la SNCF et entreprises de logistique notamment pour les derniers exploitants). De plus s'ajoute une problématique de gestion des risques d'inondation du quartier par des ruissellements urbains amplifiés par le dérèglement climatique. Par son statut d'opération d'intérêt national [4], l'engagement de l'Établissement Public d'Aménagement Euroméditerranée (EPAEM) dans le projet a permis de mobiliser le comité technique du laboratoire collectif d'innovation urbaine regroupant l'EPAEM, l'État, la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, le département des Bouches-du-Rhône, la Métropole Aix Marseille Provence et la Ville de Marseille. Le développement local d'un « petit cycle des terres » est apparu comme un des enjeux principaux d'innovation à porter en commun par ces acteurs avec de nombreux sites présentant un enjeu de renaturation, et plus globalement d'aménagement durable.

Le projet de rénovation urbaine porté par l'EPAEM présente donc une excellente opportunité de mettre en place des solutions innovantes inspirées de l'économie circulaire afin de valoriser au maximum les matières usagées produites par les travaux, ce qui passe par :

1. La production de connaissances nouvelles pour produire des indicateurs liant refonctionnalisation écologique et performances d'éco-matériaux pour la production de « passeports des sols » plus intégrés ;
2. La constitution de méthodes scientifiques capables de soutenir le déploiement de synergies entre des opérations de requalification de friches des projets circulaires, en opérationnalisant les hypothèses du métabolisme urbain ;
3. Le développement expérimental de formulations dans le cadre d'un Jardin d'Expérimentation de plus de 1000m<sup>2</sup> pour des applications d'éco-matériaux adaptées à un contexte méditerranéen particulièrement sec et sensible au changement climatique ;
4. La co-construction d'une gouvernance agile au service d'un territoire en pleine mutation, où la coopération entre les donneurs d'ordre doit permettre de tendre vers des trajectoires de soutenabilité.

Les récents progrès du génie pédologique ouvrent à présent la voie à l'élaboration de procédés de renaturation des sites permettant la remise en fonction des sols dégradés voire la construction d'un nouveau sol fertile, tout en recyclant les délaissés disponibles [5]. Beaucoup de terres excavées lors de réaménagement de sites urbains ont une granulométrie fine de type argilo-limoneuse, contenant de grandes quantités de calcium, de silice et d'hydroxydes de fer, ce qui leur confère un potentiel de fertilité intéressant, mais probablement insuffisant pour une croissance optimale de la plupart des végétaux. Ces défauts peuvent toutefois être corrigés grâce à l'adjonction d'autres matériaux secondaires en quantité moindre, pour finalement, construire un néo-sol utilisable sur le territoire pour sa renaturation.

L'approche de génie pédologique est généraliste dans le sens où les étapes en vue de construire un sol fertile s'appliquent quel que soit le contexte territorial. Mais ce dernier contraint les gisements disponibles utilisables pour formuler des mélanges au potentiel de fertilité élevé. Par conséquent, l'approche à développer doit viser d'abord la réalisation d'un sol « idéal » en termes de compositions minéralogique et chimique, de texture et de structure. Mais, si les matériaux correcteurs des terres excavées ne sont pas disponibles pour atteindre cet idéal, alors une formulation « approchée », mais toutefois optimisée, est proposée. Les défauts propres au sol construit devront être compensés par des itinéraires techniques appropriés dont l'installation de plantes particulièrement adaptées à ces conditions édaphiques. Cette approche ouvre le champ des possibles pour la renaturation des territoires dégradés. Par ailleurs, concernant le secteur étudié, mais qui pourrait s'appliquer largement aux territoires méditerranéens subissant le

dérèglement climatique, les néo-sols devront pouvoir répondre à une fonction d'infiltration rapide des pluies pour limiter les inondations, tout en garantissant un apport et un stock en eau suffisant pour les plantations.

Par la caractérisation, la formulation et la mise en œuvre des sols recomposés, l'objectif pour les institutions mobilisées dans cette recherche-action est donc de réinjecter les matières usagées du territoire dans la chaîne de valeur : les déchets deviennent des ressources, pour un usage ciblé. Il s'agit donc d'optimiser le métabolisme urbain, par la mise en place de synergies concrètes [6]. Le déploiement de ce type de synergies implique de nouveaux modèles organisationnels entre les porteurs de projet ainsi que des solutions opérationnelles pour maîtriser la gestion des risques, l'équilibre des budgets et les différentes échelles de projet. La traçabilité des matériaux, la traduction des performances en bénéfices et la coordination des opérations deviennent donc des variables essentielles pour la réussite d'une synergie.

Pour diffuser ces résultats dans l'ensemble des sphères actives dans l'aménagement du territoire, des usagers aux décideurs, le projet s'appuie de manière innovante sur des méthodes interdisciplinaires, une collaboration pluripartenariale et une participation citoyenne. L'innovation réside en effet dans l'utilisation de l'approche "lab" en tant qu'espace collaboratif où différents acteurs co-crèent et expérimentent des solutions adaptées au contexte territorial. Le concept living lab mobilise l'innovation par l'usage et par les usagers, favorisant une meilleure compréhension des enjeux locaux. Les living labs facilitent la mise en œuvre de méthodes de travail pluripartenariales et participatives, essentielles pour développer des solutions innovantes, comprises et acceptées par tous les acteurs. Localement à Marseille, ce sont le Conseil Régional Sud, la Métropole Aix-Marseille-Provence, la Ville de Marseille, le Grand Port Maritime de Marseille, l'aménageur SOLEAM et les associations qui se sont engagés au côté de l'EPAEM pour déployer ce lab. Plusieurs sites pilotes ont été identifiés à Marseille, dont le Parc des Aygalades qui va mettre en œuvre un jardin d'expérimentation capable d'accueillir ces espaces de discussion et de co-création d'une gestion intégrée des sols.

## Matériel et méthodes

Dans le cadre du projet pilote sur le foncier de l'EPAEM, il s'agit de pouvoir expérimenter des formulations afin de créer plus de 45 000 m<sup>3</sup> de terres fertiles, en utilisant un maximum de déblais du site des Aygalades (environ 120 000m<sup>3</sup> de matières usagées devrait sortir du site pour faire venir environ 100 000m<sup>3</sup> de matériaux de type « terre végétale » dédiés aux aménagements paysagers). Pour atteindre ces objectifs, une plateforme de 1,8 hectare est en cours de dimensionnement par le groupement FrichEco, qui soutient les équipes de l'EPAEM et de ses partenaires comme les maîtrises d'œuvre urbaine. Dans ce cadre, les scientifiques jouent un rôle central dans le dimensionnement d'une opération d'envergure, jamais réalisée à cette échelle ni dans un espace aussi contraint.

Ce dialogue entre les échelles doit permettre de tester des formulations et différentes modalités de mises en œuvre, sur une diversité d'opérations, avec une diversité d'acteurs.

Un premier pilote a été réalisé avec le consortium de recherche FrichEco, pour tester 11 formulations et un processus de fabrication industriel, en associant les forces vives du territoire : l'aménageur EPAEM qui souhaite explorer des solutions techniques et opérationnelles pour créer le parc des Aygalades, la maîtrise d'œuvre du parc notifié en janvier 2025 (mandataire Michel Desvignes Paysagiste), le groupe industriel Bronzo-Perasso, la Société des Eaux de Marseille qui potabilise l'eau issues du Canal de Marseille et donc de la Durance et du Verdon et l'artisan potier Poterie Ravel. Ce travail a permis de montrer la faisabilité et l'efficacité des outils d'aide à la décision produits dans le cadre de FrichEco :

1. Du sourcing des matières alternatives pouvant entrer dans des formulations ;
2. Du protocole d'identification des possibles formulations et donc des synergies entre les acteurs ;
3. Des méthodes logistiques pour optimiser les flux de matière sur le territoire ;
4. Des méthodes de préparation et de formulation en utilisant les outils industriels déjà présents sur le territoire ;

5. Des méthodes mises en œuvre pouvant permettre de réaliser de grands ouvrages d'aménagement, avec une approche de création d'éco-matériaux par typologie d'usage et par horizon de sol (chaque formulation pourra être mise en œuvre pour horizon de sol spécifique d'un sol construit).

Au-delà des expérimentations liées aux formulations, la production de connaissances nouvelles s'articule surtout sur la volonté de créer des indicateurs capables de révéler les coûts et les bénéfices. Deux axes principaux sont considérés dans cette recherche :

1. Santé des sols et fonctions de sols ;
2. Capacités techniques pour structurer une filière et applications possibles (formulations et nouveaux produits).

La qualité de ces indicateurs est directement liée à la qualité des données produites dans la recherche et à la capacité des scientifiques de développer une méthode. Il existe de nombreux travaux sur ces questions, et la recherche proposée vise à renforcer l'intégration des bénéfices environnementaux et économiques. L'ensemble des données produites dans cette recherche et l'effort de valorisation de l'existant nous amènent à caractériser et renseigner les points suivants :

- Les bases de données centralisant les informations nécessaires à l'identification de potentielles synergies ;
- Les matrices multi-critères permettant de définir le potentiel de réussite des synergies identifiées par rapport aux forces et faiblesses du territoire :
  - Capacité du territoire à absorber les gisements identifiés : filières, infrastructures ...
  - Le réseau d'acteur capable d'opérationnaliser les synergies : capacités de coopération, capacités d'innovation ...
  - Équilibre économique des synergies : économies et impacts positifs générés par les valorisations versus leur coût global de mise en œuvre ;
  - Capacité de la commande publique d'intégrer ces matériaux dans leurs opérations ;
  - Freins légaux et assurantiels.
- Les outils cartographiques et de visualisation des données centralisées permettant d'identifier et d'anticiper de possibles synergies en fonction de critères qui seront affinés au fil de la recherche :
  - Localisation des gisements sur le territoire et identification du responsable (maîtrises d'ouvrage, gestionnaires, industries ...)
  - Pérennité et récurrence des gisements ;
  - Si issus d'une opération d'aménagement : planning des opérations, modes d'extraction, logistique inverse (stockage in-situ par exemple) ... ;
  - Lithologies (pour les gisements à venir dans le cadre d'opérations d'aménagement ou d'extractions) et capacités techniques si le gisement est déjà extrait (pack ISDI, granulométrie, teneur en eau, valeur au bleu de méthylène ...)
  - Qualité et santé : liées au bruit de fond géochimique (qui sera plus ou moins précis suivant la localisation des gisements et les données à disposition), mais également aux qualités physiques et physico-chimiques en lien avec l'usage des fonciers dans le temps (industriels, tertiaire, habitat ...).
- Le protocole de suivi des opérations afin de quantifier à moyen terme les bénéfices créés par les synergies mises en œuvre, afin d'en mesurer l'efficacité et la pertinence pour le territoire ;

Une fois cet état des lieux établi, l'ensemble de ces données sont triées et interprétées en vue d'établir des lois de comportement. Pour transférer ces lois de comportement dans la société, les modèles d'organisation et de gouvernance permettant de systématiser les démarches seront étudiés en parallèle et la mobilisation des acteurs autour du site pilote devra permettre d'engager un travail de fond. Cela a été notamment engagé par l'EPAEM et la Ville de Marseille, qui dans le cadre de la Journée mondiale des Sols le 5 décembre 2024 ont monté un premier atelier de préfiguration d'un Observatoire des Sols avec une cinquantaine d'acteurs de terrains, venant d'horizons variés. Le protocole d'atelier, innovant dans sa forme avec trois tables animées en simultané et observées suivant un protocole reproductible, a permis de tirer les premières conclusions sur les niveaux de connaissances et les besoins des acteurs locaux sur la gestion intégrée des sols et la notion

de « petit cycle des terres ». En faisant varier le positionnement des participants, entre citoyens.ennes et professionnels.elles, l'EPAEM a pu centraliser de premières données pour l'émergence du Jardin d'expérimentation et sur le type d'innovation par l'usage qui pourront être déployé en local.

Cette journée de travail de préfiguration lors d'un évènement mondial a donc joué un rôle hybride pour le Living Lab, avec deux institutions partenaires du Lab : premier terrain d'observation dans un contexte situé, avec des acteurs engagés et sensibilisés, première pierre d'un édifice collaboratif où les frontières entre citoyens et professionnels se floutent pour engager une transformation vers la soutenabilité et faire atterrir localement les engagements de la Soil Mission discutée au niveau européen.

## Résultats et discussion

Les informations recueillies et traitées, couplées à de nombreuses réunions de concertation impliquant tous les acteurs, ont permis d'élaborer un plan d'expériences plus précis visant à :

1. Déployer la plateforme de valorisation permettant de mettre en œuvre les formulations dans le cadre du projet, en flux tendu et de pouvoir tester les méthodes des expérimentations à échelle réduite pour passer à une échelle 1, dans le cadre du Parc tout en maîtrisant les risques pour les équipes de maîtrise d'œuvre ;
2. Viser le déploiement d'un Jardin d'Expérimentation de plus de 1000m<sup>2</sup> sur le foncier du Parc des Aygalades afin de valider les protocoles, de faire un test des équipements et valider les équilibres technico-économiques de la plateforme, de pouvoir outiller les parcelles afin de valider les formulations ;
3. Mettre en œuvre les formulations de manière concomitante au Jardin d'Expérimentation, dans des projets de renouvellement urbain porté par l'EPAEM sur la ZAC des Fabriques, afin de comparer les résultats des parcelles à des ouvrages réels, mais à échelle moindre que le Parc ;
4. Engager un travail de fond avec les diverses sphères du Living Lab, notamment avec l'émergence d'un Observatoire des sols qui seraient ancrés et « situés » sur des sites pilotes, comme le Parc des Aygalades.

Les résultats à ce stade permettent de dessiner les grandes tendances en matière de métabolisme urbain des sols sur l'emprise de l'OIN, de mettre en avant comment les filières peuvent se structurer pour répondre à ce nouveau type de demandes des aménageurs, de poser les bases d'une gouvernance locale du « petit cycle des terres » et d'un Living Lab dynamique. De plus, les rapports directs avec la maîtrise d'ouvrage ont permis de proposer un plan d'échantillonnage du Parc des Aygalades qui dépasse les seuls enjeux de pollutions, inhérentes au plan de gestion. Il a été possible de produire une analyse bien plus fine intégrant des sujets de géotechnique et d'agropédologie. Le BRGM a pu mobiliser un nouvel outil de diagnostic sur site, couplant XRF et DRX, le MODULAB, pour réaliser des analyses minéralogiques d'échantillon. Ce travail de terrain a permis d'orienter efficacement la suite de la campagne d'échantillonnage et de pouvoir cibler les gisements les plus prometteurs pour réaliser les expérimentations de formulation de composition de néo-sols. Ce croisement entre recherche et campagne opérationnelle a permis à la maîtrise d'œuvre urbaine de mieux comprendre l'intérêt de la démarche scientifique et de pouvoir valoriser les résultats des analyses dans la suite du projet, notamment pour la question du plan de gestion et du dimensionnement des aménagements. La stratégie globale de requalification du site a donc été co-construite entre les différents acteurs, ce qui facilite l'implication des parties et, donc, le déroulé du projet. L'étape suivante consiste à dessiner avec les acteurs de terrain le Jardin d'expérimentation en s'appuyant sur les résultats du pilote mis en place en janvier 2025, d'imaginer une programmation qui a été impulsée dans le cadre de la Journée mondiale des sols du 5 décembre et qui devrait aussi permettre l'émergence d'un Observatoire des sols.

Cependant, certaines limites ont été identifiées puisqu'il existe un véritable défi pour identifier les gisements ex-situ pour les formulations, verrouiller ces stocks valorisables pour les projets des donneurs d'ordre afin de garantir la pérennité de la synergie locale en les rendant disponibles au bon moment et en quantités et qualités suffisantes pour les nouveaux aménagements. Les maîtrises d'ouvrage sont encore en incapacité à ce jour de faire des projections sur leurs besoins en traitements, en gestion et en importation, ainsi qu'en évaluation des performances et de suivi, ce qui limite leur capacité d'innovation pour activer un « petit cycle des terres » : une gestion en flux tendu entre ses besoins en importations, ses besoins en exutoires et ses

besoins en traitement. Ces incertitudes sont de véritables freins pour des maîtrises d'œuvre qui engagent leur responsabilité dans les projets d'aménagement. C'est pourquoi les expérimentations prévues en 2025, viseront à identifier les leviers permettant de lever ces différents freins.

## Conclusions et perspectives

Cette recherche montre comment développer une méthode scientifique pour faire rentrer en synergie les donneurs d'ordre d'un territoire, ayant des projets de requalification de friches, de réhabilitation écologique et plus globalement de renouvellement urbain. En s'appuyant sur le cadre de référence du métabolisme territorial [7] et de l'écologie globale [8], la méthode permet de relier qualité, fonctions et usages des sols pour produire des outils de pilotage capables de soutenir la capacité du territoire à « se réhabiliter/renouveler en circuits-courts ». De fait, le caractère innovant de cette recherche réside principalement dans la manière de co-développer la méthode globale avec les donneurs d'ordre, pour produire les outils ergonomiques capables de construire les ponts conceptuels entre la matière et le vivant [9]. L'objectif est à nouveau de répondre à des besoins d'un territoire, ce qui présuppose d'intégrer les utilisateurs finaux dans le processus de recherche et de développer les nouveaux récits permettant de mettre en mouvement les acteurs locaux sur des trajectoires de soutenabilité [10]. Le projet FricheEco est déjà très intégré, mais ne touche pas encore certaines parties prenantes, comme les associations ou certains acteurs institutionnels n'ayant pas de compétence par rapport au Parc des Aygalades. Pour gagner en généralité, cette intégration exhaustive peut sans doute être atteinte par l'intermédiaire d'un Living Lab élargi à un parterre d'acteurs locaux, impulsé par le projet APPLLEX. Des initiatives sont en cours en vue de mettre en place une telle structure, par le biais d'un Observatoire des sols et la mise en place de sites pilotes avec notamment un Jardin d'expérimentation en 2025 sur le site des Aygalades.

## Références

- [1] Affre, L., Deschamps-Cottin, M., Montes, V., & Robles, C. 2021. Chapitre 5 : La biodiversité et les changements globaux. In Guiot, J., Mazurek, H., Curt, T., & Rimbault, P. (Eds.), *Marseille et l'environnement. Bilan, qualité et enjeux : Le développement durable d'une grande ville littorale face au changement climatique*. Aix-en-Provence : Presses universitaires de Provence.
- [2] Charbonnier, P. (2020). *Abondance et liberté: une histoire environnementale des idées politiques*. La Découverte.
- [3] Mathevet, R., & Bousquet, F. (2014). *Résilience et environnement: penser les changements socio-écologiques*. Buchet/Chastel.
- [4] Bertoncello, B., Dubois, J., & Dubois, J. (2010). *Marseille Euroméditerranée: accélérateur de métropole*. Marseille: Parenthèses.
- [5] Cornu, S., Keller, C., Béchet, B., Delolme, C., Schwartz, C., & Vidal-Beaudet, L. (2021). Pedological characteristics of artificialized soils: A snapshot. *Geoderma*, 401, 115321.
- [6] Barles, S. (2017). *Écologie territoriale et métabolisme urbain: quelques enjeux de la transition socioécologique*. *Revue d'Economie Régionale Urbaine*, (5), 819-836.
- [7] Taton, T., Cramer, W., Piégay, H., & Galop, D. (2013). *Pour une écologie globale*.
- [8] Martial Viallex. (2021) *Les études de métabolisme territorial - État des lieux et perspectives*. Institut Paris Région.

[9] Perrotti, D., & Stremke, S. (2020). Can urban metabolism models advance green infrastructure planning? Insights from ecosystem services research. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 47(4), 678-694.

[10] Mazé, C. (2020). *Le concept de transformation vers la soutenabilité: de la science à l'(in) action publique. Le cas brûlant de la gouvernance des socio-écosystèmes marins et côtiers dans le climat du XXIe siècle* (conférence et soutenance HDR, La Rochelle Université).



## A decision support tool dedicated to rainwater infiltration in a context of soil residual pollution

### Vers un outil d'aide à la décision dédié à l'infiltration des eaux pluviales au plus près de la source, dans un contexte de pollution résiduelle dans les sols

Marie LEMOINE<sup>1</sup>, Sofia BOUARAF<sup>2</sup>, Guillaume SAILLARD<sup>1</sup>, David PITAVAL<sup>1</sup>, Somar KHASKA<sup>2</sup>,  
Corinne LA SALLE LE GALL<sup>2</sup>, Jean-Michel MONIER<sup>3</sup>, Marie FRASCONE<sup>4</sup>, Hervé CALTRAN<sup>4</sup>, Jean-Marie  
COME<sup>1</sup>

<sup>1</sup> GINGER BURGEAP - département R&D : [m.lemoine@groupeginger.com](mailto:m.lemoine@groupeginger.com), [g.saillard@groupeginger.com](mailto:g.saillard@groupeginger.com),  
[d.pitaval@groupeginger.com](mailto:d.pitaval@groupeginger.com), [jm.come@groupeginger.com](mailto:jm.come@groupeginger.com)

<sup>2</sup> Université de Nîmes, Laboratoire CHROME (EA7352) : [safia.bouarafa@unimes.fr](mailto:safia.bouarafa@unimes.fr), [somar.khaska@unimes.fr](mailto:somar.khaska@unimes.fr),  
[corinne.legallasalle@unimes.fr](mailto:corinne.legallasalle@unimes.fr)

<sup>3</sup> Hydreka : [jmonier@hydreka.fr](mailto:jmonier@hydreka.fr)

<sup>4</sup> Grand Lyon : [mfrascone@grandlyon.com](mailto:mfrascone@grandlyon.com), [hcaltran@grandlyon.com](mailto:hcaltran@grandlyon.com)

**Mots-clés** : aménagement, milieu urbain, eaux pluviales, sol, pollution résiduelle, sites et sols pollués, outil d'aide à la décision

Aujourd'hui, les grandes métropoles cherchent à développer des solutions d'aménagement fondées sur la nature afin de rendre les villes plus résilientes face aux enjeux environnementaux, notamment ceux liés au changement climatique. Ces solutions incluent des projets de végétalisation pour répondre aux problématiques des îlots de chaleur, ainsi que des stratégies de gestion des eaux pluviales plus respectueuses du cycle de l'eau. En ce qui concerne précisément la gestion des eaux pluviales, l'objectif général vise à infiltrer l'eau au plus près de la source, afin de favoriser la recharge naturelle des nappes phréatiques et de limiter par ailleurs les risques d'engorgement des réseaux d'évacuation des eaux usées, particulièrement face à l'intensification des épisodes pluvieux. Ces approches impliquent une désimperméabilisation des sols urbains, notamment à travers la réhabilitation des surfaces imperméables, la création de zones végétalisées, ou encore la gestion des eaux pluviales à la parcelle, avec la construction de petits ouvrages d'infiltration tels que des noues ou des tranchées drainantes.

Cependant, ces solutions d'aménagement ne sont pas sans risques pour la qualité des eaux souterraines. En effet, de nombreux acteurs impliqués dans ces projets sont peu sensibilisés aux problématiques de pollution résiduelle des sols urbains, pourtant courantes, même en dehors des sites identifiés comme relevant de la gestion des sites et sols pollués. Par ailleurs, lorsqu'il est question de la compatibilité entre la qualité des sols et un projet d'aménagement, les acteurs manquent de valeurs repères ou réglementaires adaptées. En l'absence de ces valeurs, les professionnels du domaine des sites et sols pollués se réfèrent souvent aux valeurs ASPITET et aux seuils ISDI comme critères de référence. Si ces seuils sont dépassés, le projet d'aménagement est généralement abandonné, et les sols sont recouverts par des revêtements imperméables, par mesure de précaution.

Face à ces constats, il semblerait utile de développer un outil d'aide à la décision, afin d'encourager l'élaboration de nouvelles stratégies d'aménagement plus respectueuses du cycle de l'eau tout en préservant la qualité des eaux souterraines.

Le projet INFUSE, co-financé par l'ADEME (2022-2025), vise dans ce contexte à élaborer une méthodologie permettant d'évaluer les risques associés à la désimpermeabilisation en présence de pollutions résiduelles dans les sols. Le projet se concentre sur l'infiltration des eaux pluviales, un usage qui maximise les risques d'impacts sur la qualité des eaux souterraines en raison de l'infiltration d'eaux collectées et dégradées par le ruissellement urbain, dans des sols urbains présentant souvent des pollutions résiduelles.

Ce projet adopte une approche intégrée pour étudier les mécanismes de transfert et de relargage des contaminants depuis les sols urbains jusqu'aux eaux souterraines. Il se compose de deux volets complémentaires :

- Un volet expérimental réalisé en 2024 et tout début 2025, avec un suivi sur 12 mois à travers une noue d'infiltration construite sur des sols impactés par des pollutions résiduelles (MTX, HCT, HAP). Ce dispositif est instrumenté pour mesurer des paramètres physico-chimiques influençant la mobilité des polluants (pH, potentiel Redox, température, conductivité, O<sub>2</sub> dissous) et pour caractériser les eaux pluviales entrant dans l'ouvrage, les eaux interstitielles en zone non saturée, et les eaux souterraines.
- Un volet de modélisation numérique 3D, prévu en 2025, visant à créer un outil d'aide à la décision qui évalue les transferts de polluants depuis la surface, dans la zone non saturée et jusqu'à la nappe. Ce modèle prendra en compte des paramètres couramment mesurés lors des diagnostics (type de polluant, concentration dans les sols, lithologie, perméabilité, porosité, etc.) ainsi que le système d'infiltration des eaux pluviales.

En mars 2025, les travaux expérimentaux seront achevés et les travaux de modélisation en cours. La présentation de ce projet lors de l'édition d'Intersol sera l'occasion d'échanger avec les différentes parties prenantes dans l'aménagement urbain autour des enjeux de l'infiltration des eaux pluviales en milieu urbain qui pourraient être résumés comme suit : « Infiltrer les eaux pluviales au plus près de la source pour favoriser la recharge naturelle des nappes, oui, mais en pleine conscience des risques potentiels pour la qualité des eaux souterraines ».

## Contaminant Treatment with Sequestered Residuals: Combining In Situ Stabilization (ISS) and In Situ Chemical Oxidation (ISCO)

Brant Smith and Josephine Molin – Evonik Corporation, USA  
Erwan Goulian and Mike Mueller – Evonik GmbH, Germany

**Background / Objectives:** In situ stabilization (ISS) and in situ chemical oxidation (ISCO) are well-established remediation technologies that have been used to treat contaminated sites since the late 1990s. These technologies can be combined in a single application reducing costs to clients and site owners. The result of a combined application is a level of destruction of the contaminant by the ISCO with the residual contamination solidified in a monolith that is conducive to redevelopment. Both technologies reduce the spread and leachability of contaminants, ISS by reducing the soil's hydraulic conductivity, decreasing pore space, and binding some contaminants while provided the desired soil stability and ISCO by reducing the contaminant mass available to leach or partition into the air (vapor) or groundwater.

**Approach / Activities:** ISCO/ISS has been evaluated in a series of bench and full-scale applications. Bench studies evaluate varying dose combinations of sodium persulfate with different binders were analyzed based on its effect on soil stability, hydraulic conductivity and leaching. This presentation will provide a history of the development of the two technologies, review scientific theory and discuss the limitations of each technology. Data from bench scale experiments and field applications will be presented to illustrate how both concentration and stabilization goals can be achieved in a combined application.

**Results / Cost Efficiencies / Lessons Learned:** Data show that addition of the oxidizing agent sodium persulfate can make an ISS application more efficient by reducing the total amount of additives (binder + oxidizing agent). This in turn reduces the mass of soil that is displaced and the need for further handling and disposal of excess soil masses. A combined ISCO / ISS strategy can thus result in significant cost and energy savings. Addition of sodium persulfate has also resulted in lower hydraulic conductivity and higher strength compared to soils treated with cement only at a similar dose of cement. Data from field applications will illustrate a reduction in the concentration of more mobile substances such as benzene, naphthalene, and other lighter petroleum products to under exposed action targets, while remaining heavier hydrocarbons were bound with the addition of binders and achieved the targets for reduced leachability. Data on cost savings compared to dig and haul at several sites will also be presented.

Key Words: ISCO, ISS, Oxidation, Solidification, Contaminant  
Objectives: Present data on the evolution of a combined remedy

Brant.smith@evonik.com

## **Gestion des Espèces Végétales Exotiques Envahissantes (EVEEs) sur les Sites et Sols Pollués : Une valorisation innovante par la séquestration**

### *Management of Invasive Alien Plant Species (IAPS) on Contaminated Land: An Innovative Valorisation through Sequestration*

#### Résumé :

Les espèces végétales exotiques envahissantes (EVEEs) constituent une menace multidimensionnelle pour la biodiversité, les écosystèmes et la santé humaine, tout en générant des impacts économiques significatifs. Sur les sites et sols pollués, souvent caractérisés par des sols rudéraux et des conditions anthropisées, les EVEEs trouvent un milieu favorable à leur prolifération. Ces espaces, marqués par une hétérogénéité des sols et une faible présence de matière organique, amplifient les risques de dissémination et de domination des espèces locales.

Les méthodes traditionnelles de gestion (compostage, méthanisation, incinération) s'avèrent souvent inefficaces et risquées dans ces contextes spécifiques.

Une alternative innovante, la séquestration, permet de transformer les EVEEs en biomatériaux pouvant remplacer les plastiques pétrosourcés, tout en s'intégrant dans une approche d'économie circulaire. Ce processus, basé sur une collecte maîtrisée et une transformation brevetée, valorise les polluants biologiques tout en limitant les impacts négatifs sur la biodiversité locale. Spécifiquement adaptée aux sites et sols pollués, cette solution contribue à leur réhabilitation tout en offrant des bénéfices environnementaux, économiques et climatiques.

*Invasive alien plant species (IAPS) pose a multidimensional threat to biodiversity, ecosystems, and human health, while also generating significant economic impacts. On contaminated sites, often characterized by ruderal soils and anthropized conditions, IAPS find an environment conducive to their proliferation. These areas, marked by soil heterogeneity and low organic matter content, exacerbate the risks of dispersion and dominance over local species.*

*Traditional management methods (composting, anaerobic digestion, incineration) often prove inefficient and risky in these specific contexts.*

*An innovative alternative, sequestration, enables the transformation of IAPS into biomaterials that can replace petrochemical plastics while in line with a circular economy approach. This process, based on controlled collection and patented transformation techniques, adds value to biological contaminants while mitigating negative impacts on local biodiversity. Tailored specifically for contaminated land, this solution supports their rehabilitation while delivering environmental, economic, and climatic benefits.*

#### Intervenant :

Sébastien Illovcic pour ADEV Environnement, une société RSK France

# On Site thermal treatment of mercury and pesticide impacted soils from former chlor-alkali plant

Jan Haemers ([jan.haemers@haemers-tech.com](mailto:jan.haemers@haemers-tech.com)) – CEO  
(Haemers Technologies, Brussels, Belgium)

## Background and Objectives

The redevelopment of former industrial sites is a growing necessity as urban spaces are reclaimed for safer and sustainable use. The former chlor-alkali plant in Acre Bay, Israel—a 40ha site operational between 1956 and 2003—presents a unique challenge. The site is heavily contaminated with mercury from historical production processes and pesticides used during its operational lifetime. These contaminants pose significant risks to human health, ecosystems, and the feasibility of future site use.

Traditional remediation methods, such as excavation and off-site disposal, are unsustainable due to their high costs, logistical complexities, and the long-term risks associated with landfill storage. Instead, Haemers Technologies, in collaboration with LDD Advanced Technologies and Tidhar, has implemented an on-site thermal treatment strategy to safely and efficiently remediate the contaminated soils. This approach focuses on mercury recovery and the simultaneous treatment of multiple contaminants, paving the way for the site's redevelopment while adhering to stringent environmental and sustainability standards.

## Approach and Activities

Following a successful pilot phase in 2022, the project transitioned to full-scale treatment in late 2023. The thermopiles, containing 4000 tons of contaminated soil, are undergoing Ex Situ Thermal Desorption (ESTD) at a target average temperature of 350°C. The process is designed not only to achieve regulatory compliance for contaminant levels but also to actively recover mercury, preventing its release into the environment.

## Results and Lessons Learned

The full-scale thermal remediation process highlights several achievements:

- **Mercury Recovery:** Captured mercury vapors are condensed and treated, preventing environmental release.
- **Sustainability:** On-site remediation minimizes transport emissions and the reliance on landfilling.
- **Efficiency and Versatility:** The method successfully remediates soils with diverse contaminants while ensuring compliance with air emission standards.

## Conclusion

This project represents a milestone in sustainable remediation, showcasing the technical and environmental benefits of on-site thermal treatment for soils with complex contamination profiles. It serves as a blueprint for similar projects globally, where sustainability, contaminant recovery, and multi-contaminant treatment are critical priorities.

DEMARCHE VERTUEUSE DE REHABILITATION DE FRICHES INDUSTRIELLES PAR L'ECONOMIE CIRCULAIRE, LA  
PRESERVATION DES RESSOURCES ET LE TRAITEMENT THERMIQUE ON SITE

Laurent SIBLOT<sup>1</sup>, Quentin LEPINEY<sup>2</sup>, Etienne HEISSAT<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ORTEC-SOLEO, 315, rue du Mont de Terre, Fretin, 59273, France

<sup>2</sup> ORTEC-SOLEO, 8 ter avenue du Docteur Schweitzer, Meyzieu, 69330, France

<sup>3</sup> ARCHIMED Environnement, 5 Rue du Talus, Illkirch-Graffenstaden, 67400, France

**Caractère innovant :** Economie circulaire et préservation des ressources via la valorisation de matériaux impactés, traités on site par désorption thermique mixte (gaz et électrique).

**Mots clés :** Economie circulaire, dépollution avec réduction empreinte carbone, désorption thermique gaz et électrique, traitement in situ.

**Objectifs :** Assurer au maximum la valorisation des terres impactées de la ZAC, au moyen d'un traitement on site et de leur réemploi dans le cadre des travaux d'aménagement.

**Abstract :**

En juin 2014, la Ville de Strasbourg et l'Eurométropole de Strasbourg créent la ZAC des Deux Rives, avec comme objectif ambitieux le réaménagement, sous 15 ans, de 75 ha entre l'est de la ville et la frontière allemande. Ces opérations comprenant la création d'environ 4 000 logements, de commerces, d'établissements scolaires, de parcs et d'espace publics. La SPL Deux Rives, en charge de la gestion de la ZAC, construit le projet d'aménagement sur deux axes principaux, la conservation du patrimoine historique d'une part et la mise en place d'une démarche d'économie circulaire et vertueuse d'autre part. Avec une consultation des opérateurs de logement et des promoteurs immobiliers, la SPL Deux Rives a en charge la réhabilitation du foncier avant aménagement et la création des infrastructures du domaine public.

La ZAC de Deux Rives se situe au droit d'une ancienne zone portuaire avec des activités d'industries lourdes, mécaniques, agroalimentaires et de stockage de charbon. Vient s'y rajouter le passif historique, à la suite des affrontements qui se sont tenus durant la seconde guerre mondiale. Tout ceci a entraîné des pollutions des sols aux hydrocarbures (HCT et HAP), aux métaux lourds, au charbon (Coke), aux macrodéchets, à l'amiante, ... Avec son engagement d'exemplarité environnemental pour la réhabilitation du foncier, la SPL Deux Rives se devait d'innover en termes d'organisation de projet. C'est de cette volonté qu'a été mis en place l'objectif de « **Zéro évacuation et zéro apport de matériaux** ».

Pour atteindre cet objectif, la SPL a mis en place une démarche globale de gestion des sols depuis la conception jusqu'à la réalisation. Cette démarche intègre les aspects suivants :

- ✓ **Global**, vision de l'ensemble de la ZAC sur les opérations (tous corps de métier), sur les contraintes et sur le budget ;
- ✓ **Mutualisé**, dès la conception tenir compte des ressources et de l'état des sols pour faire le lien entre l'existant et le futur ;
- ✓ **Innovante**, modification des pratiques habituelles par la mise en place d'outils dédiés.

La transcription de ces aspects s'est faite par l'établissement d'un **Plan Guide**, document synthétisant le planning d'aménagement, l'état des sols, les seuils de réhabilitation, la disponibilité et les besoins en matériaux. La rédaction du plan guide s'est faite via la constitution d'un catalogue pédologique

apportant une vision complète et spatiale des sols. Ceci pour quantifier les opportunités de réemploi des matériaux selon leurs caractéristiques agronomiques, géotechniques et physico-chimiques.

La réponse aux besoins de traitement et de matériaux s'est faite par la conception et l'exploitation de trois (3) plateformes dédiées sur l'emprise de la ZAC, « **La fabrique à sols** ». Chaque plateforme ayant un objectif de valorisation spécifique, agronomique, géotechnique, ou sanitaire. Les plateformes ont été mises en place dès le début des travaux en 2019.

Depuis 2019, ORTEC SOLEO assure l'exploitation de la plateforme de mise en conformité sanitaire des sols. Cette exploitation passe par la réalisation d'essais en laboratoire, d'essais pilotes puis du traitement pleine échelle des matériaux. A ce jour, 11 000 m<sup>3</sup> de matériaux ont été traités sur un objectif total de 17 000 m<sup>3</sup>. Lors de la phase 1 du projet (de 2019 à 2022) la technique de dépollution était la désorption thermique gaz. Après la réalisation, durant la phase 1, d'un essai pilote, ORTEC SOLEO a fait le choix pour la phase 2 (depuis 2024) de mettre en place une solution de désorption thermique dite mixte, avec deux (2) sources énergétiques, le gaz d'un côté et l'électricité de l'autre.

Après validation des traitements et confirmation de l'atteinte des objectifs de réhabilitation, les matériaux sont transférés vers les zones de réemploi, préalablement définis par la Plan guide, pour mise en œuvre.

En s'inscrivant dans la démarche de la SPL d'économie circulaire qui permet une optimisation des matériaux et ainsi d'un bilan carbone avantageux, ORTEC SOLEO réalise une désorption thermique avec un bilan carbone le plus faible possible. Pour cela, la consommation électrique est maximisée par rapport à la puissance du branchement de la ZAC avec la mise en place d'un dispositif de régulation automatique de la puissance totale consommée. La demande en énergie n'étant pas suffisante pour permettre le traitement des terres uniquement avec la technique électrique selon le planning fixé, le complément de chauffage des sols est réalisé par une méthode gaz. Cette méthode permet de réduire le bilan carbone par pile de 1 500 m<sup>3</sup> traitée de 46 %.

La méthode de chauffage électrique développée par ORTEC SOLEO permet de limiter drastiquement les pertes thermiques – estimée entre 20 et 30% avec la technique gaz - puisque l'ensemble du dispositif de chauffage est présent au cœur des terres. Le réseau de chauffage installé permet de distribuer la chaleur au sol avec une très bonne efficacité et présente l'avantage d'être robuste techniquement puisque que le dispositif ne nécessite pas de maintenance sur un projet d'un an et demi, à un taux de fonctionnement de 100% et peut être piloté entièrement à distance. Ce retour d'expérience est très valorisant techniquement parlant au regard des difficultés techniques rencontrées au fonctionnement en continu des brûleurs gaz.

Toujours avec cet objectif de limiter les consommations énergétique, ORTEC SOLEO a fait le choix de sélectionner un dispositif de condensation des gaz limitant significativement la puissance électrique en incorporant un dispositif innovant de condensation. Ce dispositif permet d'obtenir une puissance froide jusqu'à 250 kW en utilisant avec un minimum de consommation électrique. Ce choix de refroidissement a permis de consacrer davantage d'énergie électrique pour chauffer les sols en contre partie de la méthode gaz.

En participant à la démarche d'économie circulaire initiée par la SPL, ORTEC SOLEO a amélioré sa technique de désorption thermique on-site en réduisant significativement l'impact carbone de sa technique – une pile 100% électrique à un bilan carbone réduit de 87% par rapport à une pile chauffée au gaz avec brûlâge des gaz. Cette économie d'énergie dépensée permet, tout particulièrement en période estivale, de limiter significativement les coûts liés à l'utilisation de cette technique. Enfin, la nouvelle technique employée par ORTEC SOLEO – avec sa fiabilité et sa robustesse - permet de limiter les interventions manuelles des opérateurs ainsi que leur exposition.



## Mercredi 26 mars 2025

### **Innovation : session jeunes chercheurs/créateurs/startups**

*Modérateur : Benjamin Pauget, Responsable R&D - Tesora*

09h00

Optimisation des volumes de dépollution des sols par modélisation analytique inverse

*Alexis Gris, Doctorant - Université de Poitiers*

09h20

Retour d'expérience sur l'apport d'une nouvelle méthode d'intégration de la bioaccessibilité orale du plomb sur un territoire pilote

*Madeleine Billmann, Ingénieure de Projets et collaboratrice R&D en sites et sols pollués - Tesora*

09h40

De l'évaluation de la qualité de l'eau à celle des sédiments grâce à *Gammarus fossarum*

*Cécile Luc, Doctorante - Biomae*

10h00

Evaluation des sols contaminés en cours de renaturation à l'aide d'indicateurs de la fonctionnalité et de l'écotoxicité des sols pollués

*Julien Goutant, Thésard - Ineris*

10h20 Pause-café

### **Évaluations des risques sanitaires et environnementaux**

*Modérateur : Laurent Thannberger, Directeur scientifique – Valgo*

10h50

Optimisation de la reconversion d'une ancienne friches grâce à l'intégration de la bioaccessibilité et des risques environnementaux

*Benjamin Pauget, Responsable R&D, Associé - Tesora*

11h10

Logiciel de simulation spatialement explicite des multi-expositions et des impacts des contaminants dans les réseaux trophiques

*Virgile Baudrot, Chef d'entreprise - Qonfluens*

11h30

CARTHAGE : Contribution de l'air dans les risques et transferts associés aux HAP en agricultures urbaines : Gestion et évaluation

*Anne Barbillon, Coordinatrice de SecurAgri - AgroParisTech Innovation*

11h50

ARAGORN : Des solutions durables pour les sols contaminés en Europe

*Alexandre Perlein, Ingénieur de Projet - Microhumus*

12h10

Influence des activités microbiennes sur la mobilité, la biodisponibilité et la toxicité de l'arsenic et des métaux pour les plantes dans un déchet minier arsénié phytostabilisé

*Marina Le Guédard, Responsable R&D - LEB Aquitaine Transfert, ADERA*

12h30 Questions - Réponses - Discussions

13h00 Déjeuner

14h00

Retour d'expérience : Évaluation du transfert des PFAS en zone non saturée et en zone saturée et stratégie de dépollution

*Jérôme Texier, Ingénieur R&D - XSEM*

14h20

Comportement environnemental de certains polluants : PFAS et Amines aromatiques de type Benzidine

*Frank Karg, Directeur scientifique du groupe HPC (INOGEN JV) & Président-Directeur Général - HPC International (France & Allemagne)*

14h40

Vers une stratégie intégrée pour la gestion des données SSP : Harmonisation des échanges de données sur les gaz du sol

*Olivier Roussel, Responsable satisfaction utilisateurs - TerraIndex (Pays-Bas)*

15h00 Pause-café

15h30

Fabrication de terre fertile sur site, comment évaluer les risques sanitaires et environnementaux ?

*Olivier Pacaud, Directeur adjoint Développement - Brézillon*

15h50

Évaluation de la mine abandonnée de Zaida au Maroc et perspectives de bioremédiation

*Soufiane Alami, PhD en Biotechnologie Microbienne et Biologie Moléculaire - Faculté des Sciences, Université V Mohammed (Maroc)*

16h10

eDNA : Le microbiome du sol et une approche de la santé

*Federica Cattapan, Directeur R&D Biologie - Mérieux NutriSciences (Italie)*

16h30

Évaluation de l'efficacité de différentes mesures constructives sur les risques sanitaires résiduels en cas d'aménagement sur site à passif environnemental

*Juliette Chastanet, Directrice de projets R&D - Burgeap*

16h50 Questions - Réponses - Discussions

17h00

**Innovation : jeunes chercheurs/créateurs/startups**

**Remise des prix de l'innovation 2025**

17h30 Fin de la seconde journée



## Wednesday March 26, 2025

### **Innovation: Young researchers/creators/startups session**

*Moderator: Benjamin Pauget, R&D Manager - Tesora*

09h00

Optimization of soil remediation volumes by inverse analytical modeling

*Alexis Gris, PhD student - University of Poitiers*

09h20

Feedback on the contribution of the use of a new approach to integrate the oral bioaccessibility of lead in a pilot area

*Madeleine Billmann, Project Engineer and R&D collaborator in polluted sites and soils - Tesora*

09h40

From water to sediment quality assessment using *Gammarus fossarum*

*Cécile Luc, Doctoral student - Biomae*

10h00

Assessment of contaminated soils with plant-based solutions using indicators of functionality and ecotoxicity of polluted soils

*Julien Goutant, PhD student - Ineris*

10h20 Coffee Break

### **Health and environmental risk assessments**

*Moderator: Laurent Thannberger, Scientific Director - Valgo*

10h50

Optimization of the reconversion of an old wasteland thanks to the integration of bioaccessibility and environmental risks

*Benjamin Pauget, R&D Manager, Partner - Tesora*

11h10

Spatially explicit simulation software for multi-exposure and contaminant impact assessment in food webs

*Virgile Baudrot, Company Manager - Qonfluens*

11h30

CARTHAGE: Contribution of air to the risks and transfers associated with PAHs in urban agriculture: Management and assessment

*Anne Barbillon, Coordinator of SecurAgri - AgroParisTech Innovation*

11h50

ARAGORN: Pioneering sustainable solutions for Europe's contaminated soils

*Alexandre Perlein, Project Engineer - Microhumus*

12h10

Influence of microbial activities on the mobility, bioavailability, and toxicity of arsenic and metals for plants in arsenic-contaminated phytostabilized mining waste

*Marina Le Guédard, R&D Manager - LEB Aquitaine Transfert, ADERA*

12h30 Questions - Answers - Discussions

13h00 Lunch

14h00

Feedback: Assessment of PFAS transfer in unsaturated and saturated zones and remediation strategy

*Jérôme Texier, R&D Engineer - XSEM*

14h20

Environmental behavior of some key-PFAS and aromatic amine pollutants of Benzidine type

*Frank Karg, Scientific Director of HPC-Group (INOGEN JV) & President-CEO - HPC International (France & Germany)*

14h40

Towards an integrated strategy for environmental data management : Harmonizing soil gas data exchange

*Olivier Roussel, Customer Success Manager - TerraIndex (The Netherlands)*

15h00 Coffee Break

15h30

Manufacture of fertile soil on site, how to assess the health and environmental risks?

*Olivier Pacaud, Deputy Development Director - Brézillon*

15h50

Assessment of the Abandoned Mine of Zaida in Morocco and Perspectives on Bioremediation

*Soufiane Alami, PhD in Microbial Biotechnology and Molecular Biology - Faculty of Sciences, University V Mohammed (Morocco)*

16h10

eDNA: Soil microbiome and one health approach

*Federica Cattapan, R&D Biology Director - Mérieux NutriSciences (Italy)*

16h30

Evaluation of the effectiveness of different constructive measures on residual health risks in the event of development on site with environmental liabilities

*Juliette Chastanet, R&D Project Director - Burgeap*

16h50 Questions - Answers – Discussions

17h00

**Innovation: young researchers/creators/startups session**  
**2025 Innovation Awards ceremony**

17h30 End of the Day Two

# Optimisation of soil remediation volumes by inverse analytical modelling

Alexis GRIS<sup>1,2\*</sup>, Jacques BODIN<sup>1</sup>, Laurent CANER<sup>1</sup>

<sup>1</sup> : Université de Poitiers, IC2MP, Bât. B8, 5 Rue Albert Turpain, TSA 51106, 86073 POITIERS CEDEX 9, France, alexis.gris@univ-poitiers.fr

<sup>2</sup> : APAVE, Avenue Gay Lussac, 33370 ARTIGUES PRES BORDEAUX

## Abstract

The assessment of the volume of contaminated soil is a complex task that requires appropriate methods to estimate the concentration of pollutants in sparsely sampled areas. The aim of this work is to develop a new methodology to better estimate the total volume of soil impacted by pollution from spatially distributed point concentration data. The proposed approach is based on an inverse modelling approach using an analytical solution of flow and transport in unsaturated zones. The model is applied sequentially to triplets of points defined according to a Delaunay triangulation. The combination of the inversion results makes it possible to reconstruct a spatially heterogeneous distribution of contaminants in the subsoil.

This approach was evaluated against two synthetic cases (one homogeneous and one heterogeneous pollutant plume) and with different spatial distributions of the point data of concentrations to be inverted. The remediation volumes obtained with the inverse analytical model were compared i) with the 'pseudo' real volumes of the synthetic case and ii) with the volumes calculated by 3 spatial interpolation methods (kriging, modified quadratic Shepards and radial basis function).

This approach is simpler to implement than a spatially distributed numerical model thanks to the simplifying assumptions. The results show a significant reduction in the average error with the inverse modelling approach. Depending on the distribution of the observation points, the method developed allows a reduction of 15 to 25% in absolute error compared to spatial interpolations in a spatially homogeneous medium and of 40 to 70% in a heterogeneous media. The method is particularly useful with a limited number of points (less than 10 observation points for the cases tested). The difference is even more significant when the distribution of observation points is random. Given the encouraging results for the synthetic case, the method is to be applied to real cases.

## Keywords:

Analytical solutions, soil pollution, unsaturated zone, inversion, transport and flow modelling

# Retour d'expérience sur l'apport d'une nouvelle méthode d'intégration de la bioaccessibilité orale du plomb sur un territoire pilote

## Feedback on the contribution of the use of a new approach to integrate the oral bioaccessibility of lead in a pilot area

[madeleine.billmann@tesora.fr](mailto:madeleine.billmann@tesora.fr)

Madeleine Billmann<sup>1,2,3</sup>, Aurélie Pelfrêne<sup>1</sup>, Corinne Hulot<sup>4</sup>, Arnaud Papin<sup>4</sup>, Benjamin Pauget<sup>3</sup>

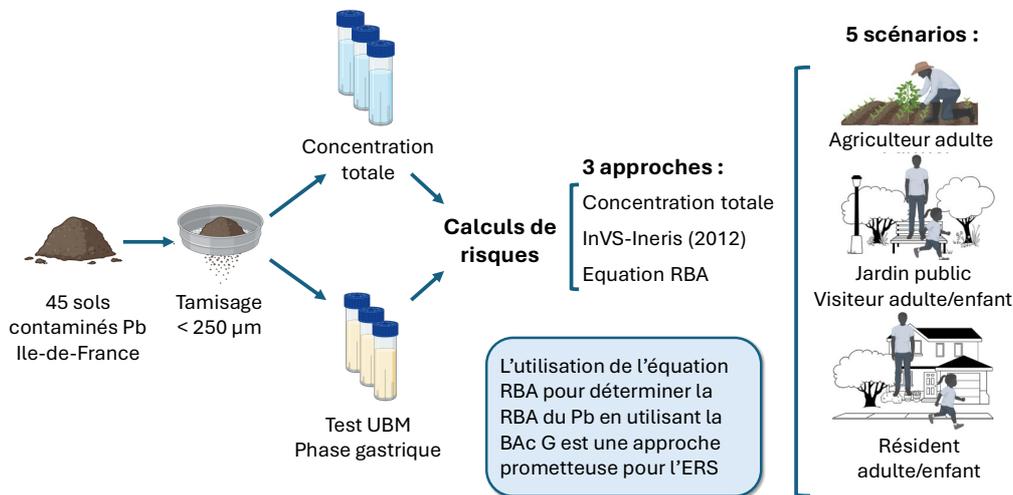
<sup>1</sup> Univ. Lille, IMT Nord Europe, Univ. Artois, Junia, ULR 4515 – LGCgE, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement, 48, Boulevard Vauban, 59000 Lille, France

<sup>2</sup> Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'Energie 20, avenue du Grésillé- BP 90406, 49004 Angers Cedex 01 France

<sup>3</sup> Tesora, 41 Rue Périer, 92120 Montrouge, France

<sup>4</sup> Ineris, Parc Technologique Alata, BP 2, 60550 Verneuil-en-Halatte, France

### Résumé graphique :



RBA : biodisponibilité relative ; BA<sub>c</sub> G : bioaccessibilité dans la phase gastrique ; ERS : évaluation des risques sanitaires

### Résumé :

Dans le cadre de la gestion des sites et sols pollués, l'évaluation des risques sanitaires liés à l'ingestion de particules de sols reste soumise à de fortes incertitudes, ce qui limite la mise en place de démarches de protection sanitaire adaptées. Afin d'améliorer l'estimation de l'exposition et d'adapter les mesures de gestion aux risques spécifiques des sites (multi)contaminés, il est essentiel d'intégrer la notion de biodisponibilité (i.e. la fraction d'un contaminant atteignant la circulation systémique) au travers la mesure de la bioaccessibilité orale (i.e. la fraction de contaminant libérée dans les fluides gastro-intestinaux et donc disponible pour l'absorption). Ce paramètre, appliqué en tant que facteur correctif de la concentration totale, permet une estimation plus réaliste de l'exposition dans les calculs de risques. Dans cette optique, le test UBM (Unified Bioaccessibility Method) permet de mesurer la fraction de polluants métalliques bioaccessibles dans les sols. Ce test normé (ISO 17924), est validé par rapport à un modèle *in vivo* (porcelet) pour l'As, le Cd et le Pb et recommandé dans la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués (MTES, 2017). Mais sa mise en œuvre et son intégration dans les calculs de risques sanitaires ont encore besoin d'être clarifiés et diffusés afin de lever tout doute ou incompréhension de la méthodologie. Un précédent retour d'expérience (REX) a permis de

conclure sur la pertinence de l'utilisation d'un test simplifié à l'HCl pour donner une première idée de la bioaccessibilité, notamment lors de grandes campagnes d'analyses, ainsi que sur l'importance de l'utilisation d'une fraction cohérente avec la voie d'exposition d'intérêt, à savoir, du sol tamisé <250 µm pour l'ingestion de sol. Ce premier REX a soulevé deux perspectives de réflexion liées aux questionnements du choix de la phase du test UBM à considérer (gastrique ou gastro-intestinale) ainsi qu'à la méthode d'intégration des données de bioaccessibilité dans les calculs de risques.

A ce jour, il est recommandé d'intégrer les données de bioaccessibilité dans les calculs de risques en suivant la méthode InVS-Ineris (2012). Il y est recommandé d'utiliser : (i) la valeur de bioaccessibilité la plus forte et/ou présentant la meilleure corrélation *in vivo/in vitro* ; (ii) un facteur d'ajustement, de 1 pour l'As et le Cd et de 2 pour le Pb, lors de l'intégration de la bioaccessibilité dans les calculs de risques. Bien que cette méthode permette une évaluation des risques plus réaliste, elle reste sujette à des difficultés opérationnelles rencontrées lors de l'intégration des données de bioaccessibilité du Pb dans les calculs de risques. En effet, il a été observé que dans de nombreux cas, la bioaccessibilité du Pb dans la phase gastrique est supérieure à 50%, ce qui limite son utilisation en raison du facteur 2 à intégrer pour affiner le risque en suivant la méthode InVS-Ineris (2012).

L'objectif de cette étude est de proposer une nouvelle démarche claire et opérationnelle à suivre lors de l'intégration de la bioaccessibilité dans les évaluations de risques et d'évaluer son apport lors de la prise compte de la bioaccessibilité orale du Pb sur un territoire pilote. Pour cela, la démarche proposée par l'InVS-Ineris (2012) ainsi que l'étude de la validation du test UBM (Caboche, 2009) ont été réétudiés. Les réflexions se sont portées sur la recommandation du choix de la phase (gastrique ou gastro-intestinale) ainsi que sur les corrélations *in vivo/in vitro* qui ont permis de valider le test UBM. Afin d'évaluer l'apport de la nouvelle méthode, les concentrations totales et bioaccessibles ont été déterminées sur 45 sols issus de jardins, parcs publics, sols agricoles et friches d'Ile-de-France issus d'un précédent REX. Des calculs de risques ont ensuite été réalisés sur ces sites pour cinq scénarios d'exposition : jardinier (adulte), espace vert public (adulte/enfant) et résident (adulte/enfant) ; en suivant 3 approches : (i) l'utilisation de la concentration totale en Pb des sols ; (ii) l'utilisation de la bioaccessibilité selon la méthode InVS-Ineris (2012) ; (iii) l'utilisation de la bioaccessibilité selon la nouvelle méthode.

Les réflexions ont permis de proposer une nouvelle démarche qui recommande l'utilisation des données de bioaccessibilité de la phase gastrique pour le Pb. La bioaccessibilité du Pb dans cette phase présente à la fois la meilleure corrélation *in vivo/in vitro* et correspond à la phase dans laquelle le Pb est le plus bioaccessible. Pour intégrer la bioaccessibilité du Pb dans les calculs de risque il est proposé d'utiliser les équations de corrélation *in vivo/in vitro* établies dans les travaux de Caboche (2009), lors des comparaisons des données de bioaccessibilité relative (UBM) aux données de biodisponibilité relative (porcelet). Ainsi la biodisponibilité relative déterminée, peut être intégrée dans les calculs de risque au moment de l'ajustement de la dose journalière d'exposition. Cette dernière pourra ensuite être comparée aux valeurs toxicologiques de référence.

La reconsidération des recommandations de l'InVS-Ineris (2012) et des travaux de Caboche (2009) ont permis de proposer une nouvelle démarche opérationnelle à suivre lors de l'intégration des données de bioaccessibilité aux calculs de risques dans le but d'affiner l'estimation de l'exposition. Ce REX sur l'apport de la nouvelle méthode sur un territoire pilote d'Ile-de-France a montré qu'elle présente un réel intérêt pour affiner l'évaluation de l'exposition par rapport à l'approche classique basée sur les concentrations totales, ainsi que par rapport à l'approche actuellement recommandée (InVS-Ineris, 2012), car moins limitante pour le Pb.

## De l'évaluation de la qualité de l'eau à celle des sédiments grâce à *Gammarus fossarum*

Cécile Luc-Rey<sup>1,2</sup>, Caroline Arcanjo<sup>1</sup>, Anthony Mathiron<sup>1</sup>, Olivier Geffard<sup>2</sup>, Guillaume Jubeaux<sup>1</sup>

[cecile.luc@biomae.fr](mailto:cecile.luc@biomae.fr)

<sup>1</sup> Biomonitoring Aquatic Environment - BIOMAE, 320 Rue de la Outarde, 01500 Château-Gaillard, France

<sup>2</sup>RiverLy - Fonctionnement des hydrosystèmes - INRAE, 5 rue de la Doua, 69100 Villeurbanne, France

The introduction of chemical substances (micropollutants) into the environment is recognised as one of the main causes of the decline in biodiversity worldwide. For over 10 years, Biomae, a spin-off from INRAE's ecotoxicology laboratory, has been deploying on a large scale an innovative biomonitoring solution based on the engagement of gammarids (crustaceans) directly in watercourses to characterise chemical pollution in aquatic environments<sup>1,2</sup>. These AFNOR-standardised tools, used within a regulatory framework (Water Framework Directive) by the Water Agencies, are also used by local authorities and industry to better characterise the impact of their discharges (e.g. wastewater treatment plants) on the environment. With this expertise (more than 8,000 engagements encounters in France), the Biomae laboratory, in partnership with INRAE, aims to offer sediment management stakeholders new bioassays for assessing their toxic impact. This initiative is in line with a guide published by the OFB in 2019, which proposes a battery of bioassays, including the gammarid as an interesting species for assessing sediments. Sediments often act as reservoirs for various contaminants such as metals, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), polychlorinated biphenyls (PCBs) and per-polyfluoroalkyl substances<sup>3</sup>, which can affect the benthic organisms that interact closely with them. The aim of this presentation is to present Biomae activities and then focus on sediment toxicity by describing the protocols used and the initial results that will enable us to discriminate sediments according to their toxicity.

keywords : ecotoxicology, *Gammarus fossarum*, sediment, toxicity

- (1) Geffard, O.; Xuereb, B.; Chaumot, A.; Geffard, A.; Biagianti, S.; Noël, C.; Abbaci, K.; Garric, J.; Charmantier, G.; Charmantier-Daures, M. Ovarian Cycle and Embryonic Development in *Gammarus Fossarum*: Application for Reproductive Toxicity Assessment. *Environmental Toxicology and Chemistry* **2010**, *29* (10), 2249–2259. <https://doi.org/10.1002/etc.268>.
- (2) Coulaud, R.; Geffard, O.; Vigneron, A.; Quéau, H.; François, A.; Chaumot, A. Linking Feeding Inhibition with Reproductive Impairment in *Gammarus* Confirms the Ecological Relevance of Feeding Assays in Environmental Monitoring. *Environmental Toxicology and Chemistry* **2015**, *34* (5), 1031–1038. <https://doi.org/10.1002/etc.2886>.
- (3) Casado-Martinez, C.; Pascariello, S.; Polesello, S.; Valsecchi, S.; Babut, M.; Ferrari, B. J. D. Sediment Quality Assessment Framework for Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Results from a Preparatory Study and Regulatory Implications. *Integr Environ Assess Manag* **2021**, *17* (4), 716–725. <https://doi.org/10.1002/ieam.4412>.

**ÉVALUATION DES SOLS CONTAMINÉS EN COURS DE RENATURATION**  
**À l'aide d'indicateurs de la fonctionnalité et de l'écotoxicité des sols pollués**

**ASSESSMENT OF CONTAMINATED SOILS WITH PLANT-BASED SOLUTIONS**  
**Using indicators of functionality and ecotoxicity of polluted soils**

Julien GOUTANT<sup>1</sup>, Annabelle DERAM<sup>2</sup> et Valérie BERT<sup>1</sup>

<sup>1</sup> : Unité Impact Sanitaire et Expositions, INERIS, Parc Technologique ALATA, BP2, Verneuil-en-Halatte,  
[julien.goutant@ineris.fr](mailto:julien.goutant@ineris.fr), [valerie.bert@ineris.fr](mailto:valerie.bert@ineris.fr)

<sup>2</sup> : Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement, Université de Lille, Bâtiment ESPRIT, Cité  
Scientifique, 59655, Villeneuve d'Ascq Cedex, [annabelle.deram@univ-lille.fr](mailto:annabelle.deram@univ-lille.fr)  
[\\*julien.goutant@ineris.fr](mailto:*julien.goutant@ineris.fr)

**Mots-clés** : Phytomanagement, solutions fondées sur la nature, réhabilitation et refonctionnalisation des sols impactés ou dégradés, cocktail.

**Caractère innovant** : L'étude conduite en milieu urbain se base sur l'utilisation combinée du végétal et d'amendements du sol pour gérer durablement des sols pollués par un cocktail de polluants organiques et inorganiques (phytotechnologies). Au-delà de l'évaluation de l'efficacité de ces stratégies pour réduire l'exposition aux polluants, l'étude se propose d'évaluer la fonctionnalité du sol géré par ses techniques à l'aide d'indicateurs de fonction et de mettre en évidence les éventuelles dégradations dues à la présence de polluants et améliorations apportées par les phytotechnologies.

**Objectifs** : L'étude vise à évaluer l'exposition, l'écotoxicité et la fonctionnalité des sols contaminés par des pollutions diffuses. Grâce à la renaturation de ces sols par divers procédés basés sur l'utilisation d'espèces végétales et d'amendements du sol, l'objectif est de caractériser et suivre l'efficacité des solutions de gestion mises en œuvre sur plusieurs sites urbains contaminés par des métaux et en HAP, et de caractériser les gains écologiques de cette gestion en s'appuyant sur des indicateurs physico-chimiques, agro-pédologiques, écotoxicologiques et biologiques pour renseigner la fonctionnalité du sol.

### Résumé

L'écosystème constitué par le continuum sol-plante-eau peut être exposé à des situations de pollution, notamment aux métaux et HAP. De nouvelles utilisations des sols pollués peuvent être envisagées afin de les protéger et de restaurer voire d'améliorer leurs fonctions tout en réduisant l'exposition aux polluants. Dans ce contexte, des approches de réhabilitation écologique qui prennent en compte le degré de dégradation de l'écosystème, les utilisations futures des terres, le caractère abordable des solutions et l'impact du changement climatique peuvent être pertinentes. Ainsi, à travers un projet en cours (REVE), plusieurs couvertures végétales couplées à des amendements du sol sur des sites contaminés seront suivies. De plus, divers indicateurs physico-chimiques, biologiques et écotoxicologiques seront mesurés pour caractériser la qualité du sol en relation avec ces couverts végétaux ainsi que la qualité et la santé de ces derniers. Les meilleures stratégies pour réduire l'exposition aux métaux tout en offrant d'autres avantages sur les fonctions du sol, l'amélioration de la biodiversité et les services écosystémiques seront étudiées.

### Abstract

The ecosystem composed of the soil-plant-water continuum can be exposed to pollution, particularly from metals and PAHs. New uses for polluted soils can be explored to protect, restore, or even enhance their functions while reducing pollutant exposure. In this context, ecological rehabilitation approaches considering ecosystem degradation levels, future land use, cost-effectiveness, and climate change impacts are relevant. Through one ongoing project (REVE), multiple vegetation covers in synergy with soil amendments on

contaminated sites are being monitored. Various physical, chemical, biological, and ecotoxicological indicators are measured to assess soil quality and functionality in relation to these covers and the health and quality of the vegetation. The best strategies for reducing pollutant exposure while enhancing soil functions, biodiversity, and ecosystem services will be identified.

## Introduction

La méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués (SSP) repose sur la gestion des risques sanitaires et environnementaux suivant l'usage des milieux. Cet enjeu conduit à développer des méthodes de gestion des sols afin de réduire l'exposition aux polluants des populations et de l'environnement. Les avancées réglementaires récentes en matière de biodiversité et de climat couplées notamment avec la proposition d'une directive sur la surveillance et la résilience des sols et l'adoption d'un décret sur les usages en gestion des SSP dont l'usage de renaturation (**Usage n°7, Article 1, Décret n°2022-1588 du 19 décembre 2022**) sont de nature à inciter les acteurs des SSP à s'intéresser à des alternatives respectueuses de l'environnement. Dans ce contexte, un regain d'intérêt est porté aux solutions de gestion des sols pollués basées sur le végétal (**Bert et al., 2017**). Le couvert végétal réduit l'exposition aux polluants en limitant le contact direct avec le sol. Il freine également l'érosion, l'envol de poussière et les transferts de contaminants dans le sol, tant horizontaux que verticaux. Couplé à des amendements organiques, biologiques ou minéraux, le végétal peut permettre *a minima* de conserver le sol pollué en place (économie de ressources) voire d'améliorer certaines de ses fonctions tout en apportant des services écosystémiques au bénéfice des populations humaines. L'étude concerne l'évaluation d'indicateurs agro-pédo-physico-chimiques, écotoxicologiques et écologiques permettant de renseigner sur la santé des sols<sup>1</sup> contaminés par des pollutions diffuses en présence de divers couverts végétaux. L'objectif est de déterminer leur fonctionnalité et le cas échéant de les améliorer afin de rendre ces sols aptes à remplir leurs fonctions et à rendre des services écosystémiques. L'étude s'inscrit dans le projet Gésipol ADEME 2023 REVE (REqualification de sols urbains pollués par les métaux par la mise en œuvre d'un couvert VEgétal : évaluation des bénéfices écologiques et sociaux) et repose sur deux sites expérimentaux en milieu urbain qui bénéficient de résultats d'études préalables. L'usage envisagé pour les sites sont des espaces de nature non accessibles au public (noue et espace boisé) visant à développer la biodiversité et les habitats pour les écosystèmes, en privilégiant les espèces locales, conserver ou améliorer les fonctionnalités du sol. Ainsi, l'étude s'articule autour de plusieurs questions : Quelles sont les fonctions du sol impactées par la pollution ? Parmi ces fonctions, quelles sont celles qu'il faudrait restaurer ou améliorer en tenant compte de l'usage, des caractéristiques et de la pollution des sites ? Quels sont les indicateurs les plus pertinents qui renseignent sur ces fonctions ? Enfin, quelles solutions basées sur la renaturation faut-il mettre en œuvre pour réaliser ces objectifs ?

## Matériel et méthodes

Une première étape a consisté à caractériser les compartiments environnementaux des sites du projet REVE. Pour cela, des inventaires floristiques ont été réalisés pour analyser la végétation en place, ainsi qu'un échantillonnage des sols visant à examiner les pollutions présentes et à déterminer les autres propriétés des sols. Dans le cadre du projet REVE, les deux parcelles d'expérimentation se situent sur le territoire de la communauté d'agglomération Creil Sud Oise (**Figure 1**). Le site 1 est une noue végétalisée avec la poacée *Calamagrostis epigeios* situé à Creil. Le site 2 est un espace paysager en bordure d'une voie douce végétalisée avec *Arabidopsis halleri*, *Salix viminalis* et un mélange d'espèces naturelles majoritairement représentées par l'ortie dioïque (*Urtica dioica*) et le gaillet gratteron (*Galium aparine*). Les deux sites présentent les mêmes caractéristiques de pollution ( $C_{\text{totale}}$  en  $\mu\text{g/g}$  de sol sec : Cd :  $1,66 \pm 0,02$  ; Cu :  $113 \pm 37$  ; Pb :  $263 \pm 83$  ; Zn :  $616 \pm 248$  ; somme des 16 HAP :  $10,32 \pm 2,55$ ). De plus, ils bénéficient de résultats issus de nombreuses

---

<sup>1</sup>Telle que définie dans le Chapitre 1, Article 3 de la Directive du Parlement Européen et du Conseil relative à la surveillance et à la résilience des sols (directive sur la surveillance des sols) du 5 juillet 2023.

données qui concernent les transferts de polluants métalliques sol-plante (Grignet *et al.*, 2021). Dans cet exposé, nous nous focaliserons sur le site 2.

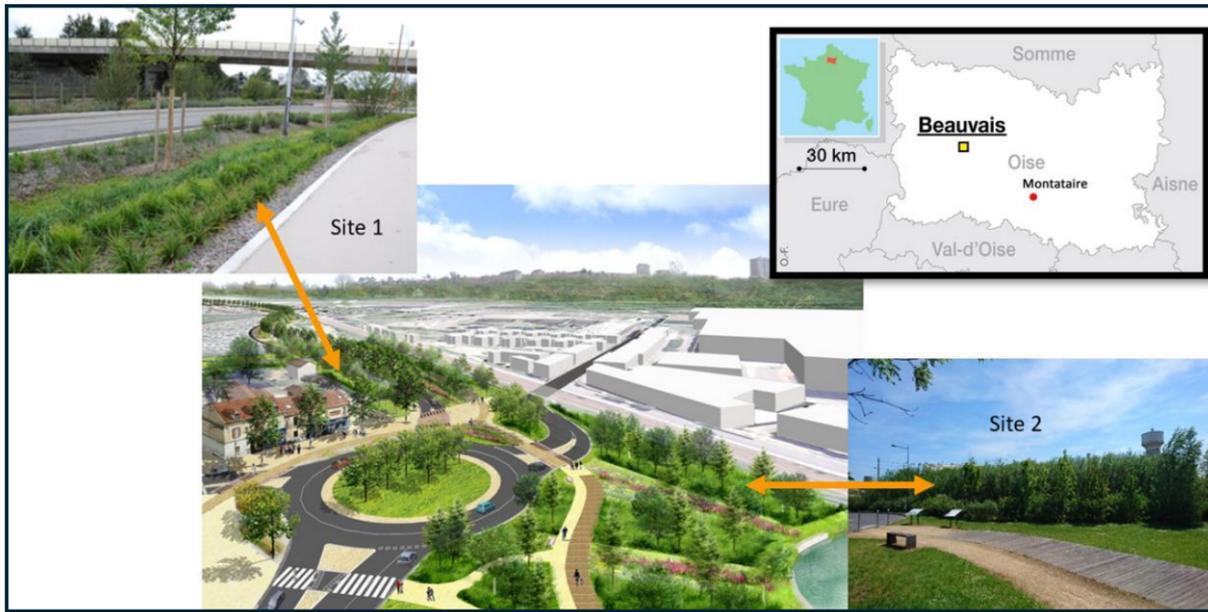


Figure 1 : Localisation des 2 sites expérimentaux proches du Carrefour des Forges à Montataire (Oise) dans le cadre du projet REVE (projet INERIS Gésipol ADEME 2023 REVE).

Deux modalités ont été établies sur ce site en fonction de la présence ou non du saule des vanniers (*Salix viminalis*). En effet, le saule des vanniers ayant été planté fait partie intégrante d'un milieu fermé nommé Modalité « **Saulaie** » (Figure 2A). Celui-ci n'occupe pas la totalité du site. En dehors de la saulaie, on retrouve un milieu ouvert nommé Modalité « **Fourré** » (Figure 2B). Les prélèvements de sols et de plantes effectués permettront de comparer la composition de ces deux milieux afin de mettre en évidence un (ou plusieurs) paramètre(s) qui les différencient.



Figure 2 : Les deux modalités établies sur le site 2 en fonction de la présence (A) ou non (B) du saule des vanniers.

### Inventaire floristique

Un inventaire floristique est effectué au printemps dans le but de recenser le nombre d'espèces végétales présentes sur la parcelle. Il permet d'obtenir des informations sur la diversité végétale présente (abondance et richesse des espèces). De plus, un premier profil du sol peut être établi en se basant sur les exigences des espèces végétales relevées. Ainsi, les premiers inventaires floristiques ont été réalisés le 22 avril et le 22 mai

2024 sur le site 2 (REVE). Les espèces végétales ont été déterminées sur place à l'aide d'une loupe et d'une flore tandis que quelques échantillons ont été prélevés pour une meilleure détermination au laboratoire.

### **Préparation des échantillons de sols et de plantes pour les analyses en cours**

Des échantillons de sols ont été prélevés à l'aide d'une tarière manuelle lors de campagnes d'échantillonnage réalisées le 28 mai et le 7 juin 2024 sur le site 2 du projet REVE afin d'étudier la pollution inorganique (Cd, Cu, Pb, Zn notamment) et organique (HAP, HCT et PFAS) dans les deux modalités établies dans le but de détecter d'éventuelles dégradations. Les concentrations totales et extractibles en métaux ont été mesurées sur des échantillons de sols séchés, broyés et tamisés à 2mm, suivis d'une minéralisation à l'acide fluorhydrique pour extraire les métaux présents. Les minéralisats obtenus ont été analysés à l'ICP-MS. D'autres analyses, en cours ou prévues, visent à évaluer les propriétés agro-pédo-physico-chimiques, la qualité microbiologique (respiration basale, extraction ADN) et écologique des sols. Des échantillons de parties aériennes d'ortie dioïque et de gaillet gratteron, espèces dominantes des deux modalités, ainsi que des feuilles de saule des vanniers dans la modalité « Saulaie » ont également été prélevés lors d'une campagne réalisée le 26 juin 2024. L'objectif est d'évaluer les transferts sol-plante et de calculer les facteurs de bioconcentration. Les concentrations en métaux ont été mesurées sur des échantillons séchés et broyés avant de subir une minéralisation à l'acide nitrique. Les minéralisats obtenus ont été analysés à l'ICP-OES. Ces résultats permettront de déterminer leur comportement accumulateur ou non vis-à-vis d'une pollution inorganique. En parallèle, les concentrations en éléments majeurs et traces dans les plantes ont été mesurés pour mettre en évidence d'éventuelles carences (compétition avec les métaux). Enfin, des indicateurs de fonctionnalité des sols (dégradation de la matière organique, activités enzymatiques) et d'écotoxicité des sols (viabilité, croissance et reproduction des nématodes) seront réalisés pour évaluer la santé et la qualité du sol à l'instant t0. Les derniers échantillons de sols, placés sous serre (trois serres par modalité), servent pour des tests de germination afin d'exprimer la banque de graines du sol et identifier de nouvelles espèces végétales non-inventoriées.

### **Résultats et discussion**

#### **Inventaire floristique**

Sur le site 2 du projet REVE, l'inventaire floristique a permis de recenser 42 espèces de 25 familles différentes (ortie dioïque et gaillet gratteron compris) dont 38% sont exclusivement présentes dans la modalité « Saulaie » et 36% dans la modalité « Fourré ». Aucun symptôme visible de toxicité n'a été observé sur les espèces relevées. Toutes les espèces sont indigènes. La bibliographie sur chacune des espèces végétales identifiées a permis d'établir un premier profil de sol qui est le suivant : présence d'un sol humide, argilo-limoneux, à tendance calcaire, avec un pH compris entre 6,5 et 8,0, riche en nutriments (N, P, K) et en matières organiques.

### Caractérisation agro-pédo-physico-chimique des milieux

Les analyses agro-pédo-physico-chimiques effectuées (**Tableau 1**) vont permettre de confirmer le premier profil de sol. Chaque valeur est comparée aux valeurs de référence fournies par le laboratoire partenaire.

Analyses	Modalité « Fourré »	Modalité « Saulaie »	Valeurs de référence
pH-H <sub>2</sub> O	7,93 ± 0,05 a	8,03 ± 0,08 a	6,5-8,0
Texture du sol	Limoneux	Limoneux-sableux	/
N total (%)	0,17 ± 0,01 a	0,13 ± 0,004 b	0,1-2,0
Rapport C/N	15,8 ± 2,4 a	17,7 ± 0,9 a	8,0-12,0
Matière organique totale (%)	4,7 ± 0,8 a	4,1 ± 0,3 a	1,0-5,0
CaCO <sub>3</sub> total (%)	12,6 ± 2,6 a	10,2 ± 0,5 a	10,0-60,0
P échangeable Olsen (mg/kg) P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	103 ± 5,5 a	80 ± 5,6 b	50-500
K échangeable (mg/kg) K <sub>2</sub> O	232 ± 2,5 a	185 ± 4,1 b	100-500

*Tableau 1 : Quelques paramètres agro-pédo-physico-chimiques mesurés dans les sols des deux modalités établies sur le site 2. Les différences significatives entre les modalités sont indiquées par les différentes lettres à un seuil de risque  $\alpha = 0,05$ .*

Au regard des paramètres mesurés, le pH, la matière organique totale et le CaCO<sub>3</sub> total confirme le premier profil de sol. En effet, un sol est considéré comme calcaire lorsqu'il contient plus 10% de CaCO<sub>3</sub> (**TERREOM, 2022**) et est riche en matières organiques à partir de 4 à 5%. Par ailleurs, un rapport C/N supérieur à 12 est observable dans les sols riches en matières organiques (**Lagrange et al., 2022**). Il traduit une capacité de minéralisation du N organique plus réduite (proportion élevée de C organique par rapport au N total). Cela signifie que l'azote est en quantité suffisante pour les plantes, tout comme le phosphore et le potassium, avec des concentrations plus élevées dans la modalité « Fourré ». Le pH alcalin mesuré tend à réduire la mobilité des métaux dans la solution du sol (**Kabata-Pendias, 2010**) mais peut conduire à des carences en oligo-éléments essentiels (Cu, Fe, Mn, B). Enfin, bien que la texture diffère entre les deux modalités, elles restent équilibrées, fertiles, favorables au développement des plantes et offrent une bonne perméabilité à l'eau et à l'air.

### Tests de germination

Dans chaque serre, le nombre d'espèces et d'individus par espèce a été recensé pour identifier d'éventuelles espèces qui n'ont pas été répertoriées lors des inventaires floristiques, notamment en raison de la compétition végétale, etc. (**Tableau 2**). Par la suite, ces données serviront à calculer des indicateurs écologiques tels que l'indice de Shannon qui permet d'évaluer la diversité végétale d'un site (**Shannon & Weaver, 1949**).

Paramètres	Modalité « Fourré »	Modalité « Saulaie »
Nombre moyen de germinations	119 ± 17 a	99 ± 7 a
Nombre moyen d'espèces différentes	16 ± 2 a	18 ± 2 a
Espèce la plus abondante	Ortie dioïque	Lampsane commune

Tableau 2 : Nombre moyen de germinations et d'espèces différentes dans les serres des deux modalités établies sur le site 2. Les différences significatives entre les modalités sont indiquées par les différentes lettres à un seuil de risque  $\alpha = 0,05$ .

Aucune différence significative n'a été observée entre les deux modalités quant au nombre de germinations et d'espèces différentes. Sur le site 2, les espèces les plus abondantes sont l'ortie dioïque et le gaillet gratteron. Dans la modalité « Fourré », les trois serres ont rapidement été dominées par l'ortie et est l'espèce la plus abondante (représentant 38 à 55%). Le gaillet, en revanche, n'a été retrouvé que dans une seule serre avec un unique individu. Pour la modalité « Saulaie », l'espèce la plus abondante est la lampsane commune (représentant 23 à 36%), espèce non-répertoriée lors de l'inventaire floristique. L'ortie dioïque est également présente dans les trois serres, tandis que le gaillet gratteron est observé dans deux d'entre elles. En outre, des collemboles et des vers de terre ont été détectés dans les deux modalités, indiquant que la contamination aux métaux et aux HAP ne limite pas l'établissement de la microfaune du sol. Enfin, ces tests de germination ont permis d'identifier 30 espèces de 22 familles différentes dont 30% sont spécifiques à la modalité « Saulaie » et 20% à la modalité « Fourré ». Par ailleurs, 56% des espèces recensées lors de ces tests n'avaient pas été observées lors des inventaires précédents.

### Conclusions et perspectives

L'inventaire floristique sur le site 2, associé aux tests de germination, a démontré que la présence de polluants dans le sol n'est pas un facteur limitant pour le développement des espèces végétales. De plus, les deux modalités présentent des espèces propres à chacune. De nombreuses analyses sont en cours telles que les analyses microbiologiques (respiration basale, extraction d'ADN : diversité génétique et fonctionnelle), les activités enzymatiques en lien avec les cycles du C, N, P et S, les mesures des concentrations en polluants inorganiques et organiques (HAP, HCT, PFAS) dans les sols et les concentrations en métaux, éléments traces/majeurs dans les espèces végétales les plus dominantes dans les 2 modalités établies sur notre site. Dans cet exposé, les résultats des inventaires floristiques et des mesures des indicateurs seront interprétés au regard de la réduction des expositions aux polluants et de la fonctionnalité du sol pollué géré par les phytotechnologies. Ainsi, les résultats permettront de renforcer les acquis concernant les mesures de gestion de la pollution résiduelle basées sur l'utilisation du végétal en milieu urbain à l'aide de divers indicateurs agro-pédo-physico-chimiques, écotoxicologiques et écologiques qui reflètent les fonctions clés du sol requises pour son usage futur. D'autre part, ces travaux serviront à alimenter l'appui aux politiques publiques en matière de gestion des SPP, et plus particulièrement sur le volet usage de renaturation.

### Références

- Bert, V., Douay, F., Faure, O. & Cadière, F., ADEME, INERIS, ISA-Lille, Mines Saint-Etienne, 2017.** Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués (nouveaux résultats de recherche et démonstration).
- Décret 2022/1588 du 19 décembre 2022. Définition des types d'usages dans la gestion des sites et sols pollués.** Journal officiel de la République française, 20 Décembre 2022.
- European Commission, 5<sup>th</sup> July 2023.** Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on Soil Monitoring and Resilience (Soil Monitoring Law). COM/2023/416 final.
- Grignet, A., 2021.** Étude des performances de phytoextraction du Zn et du Cd de l'hyperaccumulateur *Arabidopsis halleri* en co-culture avec *Salix viminalis*. Sciences des sols. Université du Littoral Côte d'Opale.

**Kabata-Pendias, A., 2010.** Trace Elements in Soils and Plants, 0 edn. CRC Press.

**Lagrange, H., Le Souder, C. & Masson, E. (ARVALIS), 2022.** Analyse de terre – La matière organique du sol, un indicateur à suivre, pas forcément à corriger.

**Shannon, C.E., Weaver, W., 1949.** The mathematical theory of communication. University of Illinois Press, Urbana.

**TERREOM, 2022.** Bien comprendre son analyse de sol : Indicateurs, signification, valeur.

### **Remerciements**

Julien Goutant est financé par l'INERIS (axe de recherche COmportement des polluants et RISques du site au TErritoire). Le projet REVE est un projet financé par l'ADEME dans le cadre de l'APR GESIPOL 2023. Nous remercions la communauté d'Agglomération Creil-Sud-Oise (ACSO) pour l'accès aux sites du projet REVE.



études environnementales (indice SET escargots) a permis de démontrer la faible mobilité des contaminants métalliques y compris dans l'environnement.

### Gestion des surfaces Avant / Après

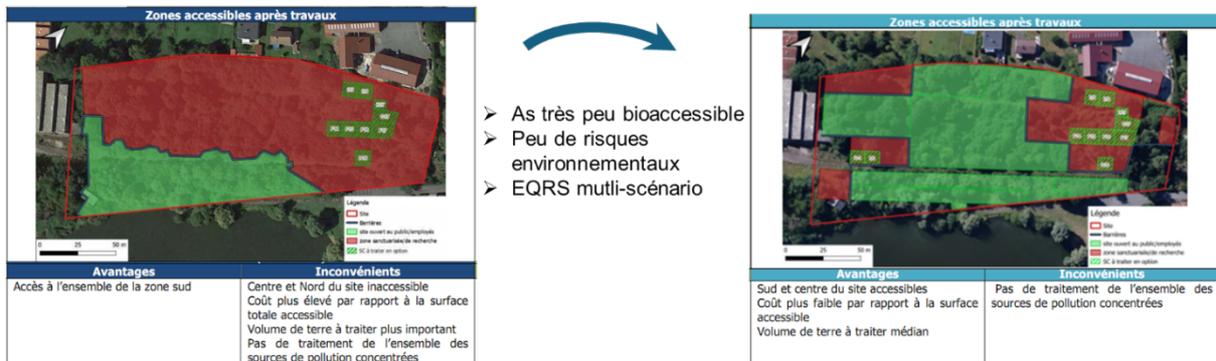


Figure 2 : Gestion des surfaces selon le PG initial (gauche) et le PG issu d'Ecopolis (droite)

Le bilan coûts-avantages a montré que la réalisation d'études supplémentaires (maillage fin, mesures de bioaccessibilité, évaluations environnementales) a conduit à des scénarios de réhabilitation techniquement, environnementalement, socialement, et économiquement plus avantageux, que ce soit pour une réhabilitation partielle ou complète du site. En effet, il apparaît qu'à budget équivalent, plus de 50% des espaces auraient pu être réouverts au public, sans risques sanitaires, quel que soit l'usage envisagé, grâce à la très faible bioaccessibilité de l'arsenic sur l'ensemble du site.

Le projet a démontré l'intérêt d'un maillage fin et de l'évaluation de la bioaccessibilité des contaminants métalliques, montrant que plus de 50% du site aurait pu être valorisé en tant qu'espace de parc urbain. De plus, la mise en place du phytomanagement dans la zone d'expérimentation scientifique a permis de sanctuariser le site tout en favorisant la biodiversité. Ce projet, axé sur la préservation des essences ligneuses, vise à promouvoir une forêt urbaine et à créer un îlot de fraîcheur. Le sentier pédagogique et le living lab créés ont permis de reconnecter les berges de l'étang, tout en offrant un espace d'échanges, de sensibilisation et de partage des connaissances sur la gestion douce des pollutions. La reconversion de ce site, marqué par un passif environnemental, est donc un succès, avec l'inauguration du "Parc des Alliaires" en septembre 2023.

Cet ancien terrain en friche est désormais un site de recherche, un démonstrateur des phytotechnologies, et un espace de médiation scientifique et ludique.

## **Spatially explicit simulation software for multi-exposure and contaminant impact assessment in food webs**

Virgile Baudrot<sup>1</sup>, Clémentine Fritsch<sup>2</sup>, Michael Coeurdassier<sup>2</sup>, Vincent Driget<sup>2</sup>, Francis Raoul<sup>2</sup>, Thomas Kleiber<sup>1</sup>, Shinji Ozaki<sup>3</sup>, et Renaud Scheifler<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Qonfluens SAS, Montpellier, France

<sup>2</sup> Chrono-environnement, UMR 6249 CNRS / UBFC, Besançon, France

<sup>3</sup> UK Centre for Ecology & Hydrology (UKCEH), Lancaster, Royaume-Uni

### **Innovative nature of the proposed topic**

We present a set of open-source software libraries for evaluating how the spatial organization of soil pollution will contribute to the contamination of species (flora and fauna) in a defined territory. One innovation is the modular building of the software as a whole and its distribution as open-source. Modularity involves making each part of the model independent (e.g., the distribution of species habitats, trophic relationships, contamination kinetics). Technically, this modularity makes the tool easier to develop and maintain, especially in an open-source context. Practically, it allows users, if necessary, to use other software for certain parts. The second innovation is to offer different models, mainly for trophic transfers, based on existing ones (Eco-SSL, US-EPA; TerraSys, Sanexen; BERISP, Wageningen and UBFC), to access both simple pre-parameterized scenarios and complex scenarios requiring more precision and data in their construction within the same approach. This desire for a generic tool has necessitated shifting the focus from the SSP field to landscape ecotoxicology, for example, by considering the same modeling tools for evaluating the impacts of plant protection products on biodiversity.

### **Keywords**

software; simulation; inference; food web; spatialization; biodiversity; TRV; multi-exposure

### **Objectives**

The SPACEMOD project (funded by ADEME - APR IMPACTS, 2024-2027) aims to develop a scenario simulator linking soil multi-contamination and impacts on biodiversity. Based on data collected since 2006 (Fritsch, Raoul, and Scheifler 2016), the scientific objective is a spatially explicit software that enables (1) characterizing spatialized profiles of multiple environmental pollutions (soils), (2) estimating multi-exposures (trace metal elements (TMEs), polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), pesticides) within a food web, and (3) assessing ecotoxicological risk at different levels of biological organization, from organisms to population dynamics.

The modeling of contaminant transfers to various species within a food web to evaluate their impacts was developed in the 1980s and 1990s (US EPA 2023). Today, some of the software resulting from these efforts is no longer maintained (TerraSys, Sanexen; BERISP, Wageningen; Eco-SSL, US-EPA), is not spatially explicit (EUSES 2.2, ECHA; Modul'ERS, INERIS) (INERIS 2013), or consists of a series of handwritten equations in scientific literature (U.S. EPA 2013; EFSA - PPR Panel et al. 2019; 2018).

However, this lack of current tools does not reflect a lack of interest, as assessing risks to wildlife requires considering the overlap of habitats with polluted areas and, by extension, the successive overlaps of habitats associated with food webs (Focks 2014). Instead, this lack of tools is due to the difficulty of making such models realistic, owing to their complexity, the low replicability of field conditions, and biological variability, which in turn limits regulatory interest that would support their development (Morrissey et al. 2023).

The innovations of the SPACEMOD project, including software modularity, open-source distribution, and transdisciplinarity (SSP and Phytosanitary), are levers that facilitate the pooling of efforts to address these challenges. Additionally, recent methods for accounting for uncertainties allow for the

characterization of safety margins rather than purely descriptive values (e.g., Bayesian inference of dose-response relationships and Toxicokinetic-Toxicodynamic models) (Baudrot et al. 2018; 2021). The software developed in SPACEMOD addresses the challenges of SSPs (and more generally, contaminated areas) by facilitating the assessment of ecotoxicological risks associated with multi-exposures in food webs.

Through its technical objectives, SPACEMOD will provide two directly usable products that can be deployed by other stakeholders: (1) libraries for modeling the trophic transfer of contaminants from soil contamination data to potentially exposed populations (flora and fauna), including the calculation of Reference Toxicological Values for mixtures, and (2) a web infrastructure that allows for the easy retrieval and linking of all databases necessary for the SPACEMOD project (Basol, Casias, GBIF, Biodiversité INPN, Tox/Ecotox US-EPA, BNV-d, RPG, CarHab, etc.), the addition of new data collected from study sites, and the launching of simulations of previously constructed models.

The software will also serve as a mediator between the various stakeholders in SSPs by illustrating the issues related to ecosystem risks through visuals (interactive graphics and maps). It is with this goal in mind that we wish to present the project at the Intersol 2025 conference.

## References

- Baudrot, Virgile, Andreas Lang, Constanti Stefanescu, Samuel Soubeyrand, et Antoine Messéan. 2021. « Extension of the spatially-and temporally-explicit “briskaR-NTL” model to assess potential adverse effects of Bt-maize pollen on non-target Lepidoptera at landscape level ». *EFSA Supporting Publications* 18 (4): 6443E.
- EFSA - PPR Panel, Antonio Hernández-Jerez, Paulien Adriaanse, Annette Aldrich, Philippe Berny, Tamara Coja, Sabine Duquesne, et al. 2019. « Scientific Statement on the Coverage of Bats by the Current Pesticide Risk Assessment for Birds and Mammals ». *EFSA Journal* 17 (7). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2019.5758>.
- EFSA - PPR Panel, Colin Ockleford, Paulien Adriaanse, Philippe Berny, Theodorus Brock, Sabine Duquesne, Sandro Grilli, et al. 2018. « Scientific Opinion on the State of the Science on Pesticide Risk Assessment for Amphibians and Reptiles ». *EFSA Journal* 16 (2). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5125>.
- Focks, Andreas. 2014. « The Challenge: Landscape Ecotoxicology and Spatially Explicit Risk Assessment ». *Environmental toxicology and chemistry* 33 (6): 1193-1193.
- Fritsch, Clémentine, Francis Raoul, et Renaud Scheifler. 2016. « Ecotoxicologie de la faune sauvage - Micromammifères - Metaleurop Nord ». Chrono-environnement. doi:10.25666/DATAUBFC-2016-04-06.
- INERIS, al. 2013. « MODUL'ERS : a modular computing tool for HHRA due to contaminated sites and emissions from facilities - Ineris - Institut national de l'environnement industriel et des risques ». 2013. <https://ineris.hal.science/ineris-00971157/>.
- Morrissey, Christy, Clémentine Fritsch, Katharine Fremlin, William Adams, Katrine Borgå, Markus Brinkmann, Igor Eulaers, Frank Gobas, Dwayne RJ Moore, et Nico van den Brink. 2023. « Advancing exposure assessment approaches to improve wildlife risk assessment ». *Integrated Environmental Assessment and Management*.
- U.S. EPA. 2013. « Wildlife Scenario Builder And User's Guide (Version 1.0, Beta Test) ». U.S. Environmental Protection Agency.
- US EPA. 2023. « Food Chain Models to Assess Exposures ». <https://www.epa.gov/ceam/food-chain-models-assess-exposures>.

# CARTHAGE : Contribution de l'Air dans les Risques et Transferts associés aux HAP en Agricultures urbaines : Gestion et Evaluation

K. Perronnet<sup>1</sup>, A. Barbillon<sup>2,3</sup>, S. Guerin<sup>1</sup>, E. Catry<sup>1</sup>, C. Aubry<sup>3</sup>, N. Manouchehri<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ineris, rue Jacques Taffanel, 60550 Verneuil-en-Halatte, [karen.perronnet@ineris.fr](mailto:karen.perronnet@ineris.fr)

<sup>2</sup> AgroParisTech Innovation, 22 place de l'Agronomie, 91120, Palaiseau, France, [anne.barbillon@agroparistech.fr](mailto:anne.barbillon@agroparistech.fr)

<sup>3</sup> Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR SADAPT, 22 place de l'Agronomie, 91120, Palaiseau, France, [christine.aubry@agroparistech.fr](mailto:christine.aubry@agroparistech.fr)

<sup>4</sup> Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR SAYFOOD, 22 place de l'Agronomie, 91120, Palaiseau, France, [nastaran.manouchehri@inrae.fr](mailto:nastaran.manouchehri@inrae.fr)

**Mots-clés** : HAP, air, sol, agriculture urbaine, évaluation des risques sanitaires

**Objectif** : Le projet de recherche CARTHAGE (2018-2022) a étudié les mécanismes de transfert des HAP de l'environnement (sol versus air) vers les plantes potagères. Ainsi l'impact de quatre modalités de cultures (cultures en pleine terre, cultures en pleine terre recouverte par un géotextile, cultures en pleine terre sous serre et cultures en bacs hors-sol remplis de terre rapportée) (Figure 1) et de préparation (légume lavé, épluché, cuit) sur l'exposition et les risques sanitaires liés aux HAP a été évalué pour les travailleurs et usagers de trois micro-fermes urbaines franciliennes, ainsi que pour les consommateurs des végétaux cultivés. Le projet CARTHAGE piloté par l'Ineris en collaboration avec AgroParisTech Innovation est issu de l'appel à projet PRIMEQUAL/Ademe.

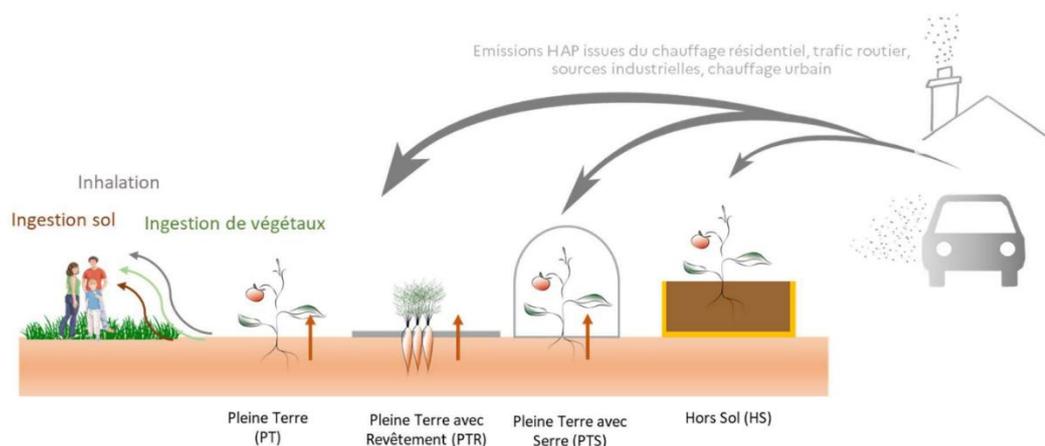


Figure 1 : Quatre modalités de cultures testées dans le cadre du projet CARTHAGE

**Caractère innovant** : On observe en France le développement de diverses formes d'agriculture urbaines : jardins associatifs (familiaux ou partagés), micro-fermes urbaines (production et mise sur le marché de denrées alimentaires), fermes urbaines spécialisées... La demande de foncier agricole en zone urbaine est croissante. Les bénéfices de ce type d'activité pour les populations urbaines sont nombreux : auto-production de produits frais ou achat de produits locaux, accès à des activités physiques et créatrices de lien social, sensibilisation au lien avec la nature etc. Pour autant, le contexte urbain est marqué par la présence de polluants et notamment des HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) liée au trafic routier, au chauffage urbain et aux activités industrielles. Il existe donc une possibilité de contamination par les HAP des végétaux potagers produits en zone urbaine via l'air et les sols. C'est dans ce cadre que l'Ineris et AgroParisTech Innovation ont monté, en collaboration avec trois micro-fermes urbaines franciliennes localisées à Nanterre, Montreuil et Saint-Denis, des essais expérimentaux pour tester 4 modalités de culture et 3 modalités de préparation de légumes pour étudier l'impact de l'air et du sol sur les teneurs en HAP dans les végétaux potagers cultivés en milieu urbain et sur les risques sanitaires associés pour les usagers.

**Résumé :** Pour étudier la contribution de la pollution atmosphérique à la contamination des végétaux, les teneurs en HAP ont été quantifiées dans l'air des trois micro-fermes. Les flux de dépôts atmosphériques d'HAP varient selon les mois de l'année, avec une tendance globale similaire entre les sites. Nanterre et Saint-Denis présentent des flux 5 à 6 fois plus élevés que Montreuil, ce dernier se rapprochant des flux d'HAP du fond rural. Les concentrations en HAP dans l'air ont été également mesurées pendant la période de croissance des légumes sur l'un des sites.

Les HAP ont été également mesurés dans les sols en place des trois micro-fermes. La micro-ferme de Nanterre affiche les concentrations les plus élevées, suivie de Montreuil puis de Saint-Denis. Le substrat apporté dans les bacs de la modalité hors-sol est nettement moins contaminé que les sols en place (teneurs en HAP 20 à 40 fois plus faibles).

Quelle que soit la micro-ferme, les salades et le persil cultivés présentent des teneurs plus élevées en HAP que les courgettes et les carottes. Les courgettes et les carottes présentent des teneurs faibles (environ deux tiers des valeurs sont inférieurs aux limites de quantification du laboratoire).

Seule la culture hors-sol avec apport de terre peu contaminée contribue significativement à la réduction des teneurs en HAP dans les salades par rapport à la culture en pleine terre. Il n'y a pas de réduction pour les autres végétaux testés. Globalement, la mise en œuvre d'une serre pour limiter les dépôts atmosphériques ou d'un revêtement pour limiter le ré-envol des particules de sol tendent à réduire les teneurs en HAP sans être significatifs. Le lavage contribue à réduire les teneurs en HAP dans les salades et le persil, tout comme l'épluchage pour les carottes. L'effet de la cuisson vapeur présente des tendances contradictoires (diminution pour les carottes cuites et augmentation des HAP pour les courgettes cuites).

L'objectif de l'Évaluation Quantitative des Risques Sanitaires (EQRS) est d'appréhender la contribution des principales voies d'exposition et des principaux HAP aux risques pour la santé des usagers des trois micro-fermes urbaines, et de quantifier l'éventuel impact des modalités de culture sur les risques sanitaires. Les trois voies d'exposition retenues sont l'inhalation de l'air, l'ingestion non intentionnelle des sols et la consommation des végétaux cultivés.

Le calcul des Quotients de Danger (QD), permettant d'évaluer les effets sanitaires à seuil et calculés pour les trois sites pour la modalité pleine terre (modalité PT) sont similaires, avec une contribution majoritaire de la voie inhalation de l'air. Pour les trois voies d'exposition, le benzo(a)pyrène est l'HAP qui tire majoritairement les risques. Les Excès de Risque Individuel (ERI), permettant d'évaluer les effets sanitaires sans seuil et calculés également pour la modalité pleine terre, sont également similaires entre les trois sites. L'ingestion de sol et de légumes est la voie majoritaire pour les risques sanitaires.

Les QD et ERI ont également été calculés pour les 3 autres modalités PTR (pleine terre avec revêtement), PTS (sous serre) et HS (hors-sol avec apport de terre peu contaminée), pour comparer cette fois-ci les effets de chaque modalité de culture sur les risques sanitaires. La culture HS est la seule modalité permettant de réduire le risque total pour les effets sans seuil (ERI) dans les trois micro-fermes. Pour les effets à seuil, il n'y a pas de différence notable entre les modalités.

Enfin, pour réduire le risque pour la santé des usagers (agriculteurs urbains, jardiniers, visiteurs, consommateurs, tous adultes ou enfants) associé à l'exposition aux HAP, les recommandations basées sur le retour d'expérience apporté par le projet CARTHAGE sont les suivantes : s'éloigner dans la mesure du possible des sources de pollution en HAP et/ou s'en protéger (par exemple par une haie dont l'efficacité reste à évaluer) ; analyser le sol, les intrants et l'eau susceptibles d'ajouter des HAP dans les sols et les plantes potagères cultivées ; garder à distance raisonnable des parcelles les pratiques qui génèrent des HAP par combustion (ex : barbecues, feux) ; appliquer les bonnes pratiques d'hygiène (lavage des mains, port de gants,...) ; appliquer les bonnes pratiques alimentaires (lavage des plantes potagères, épluchage...) ; mettre en place ou actualiser le Plan de Maîtrise Sanitaire-Agricultures Urbaines, outil de gestion des risques déjà mis en place dans les trois micro-fermes dans le cadre du programme REFUGE.



aragorn



Funded by  
The European Union

**ARAGORN: Pioneering sustainable solutions for Europe's contaminated soils**  
**ARAGORN : Des solutions durables pour les sols contaminés en Europe**

Ali Kanso<sup>1</sup>, Alexandre Perlein<sup>1</sup>, Gaylord Machinet<sup>1</sup>, Marco Uzielli<sup>2</sup>, Dorina Podar<sup>3</sup>, Gabrielle Dublet-Adli<sup>4</sup>, Anna Karrman<sup>5</sup>, Anela Kaurin<sup>6</sup>, Naila Hina<sup>7</sup>, Juliane Glüge<sup>7</sup>, Silke Gabbert<sup>8</sup>, Hans Pieter<sup>4</sup>, Xenia Trier<sup>9</sup>

1 : Microhumus SARL, 3 allée de Chantilly, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy. [a.kanso@microhumus.fr](mailto:a.kanso@microhumus.fr) ; [a.perlein@microhumus.fr](mailto:a.perlein@microhumus.fr) ; [g.machinet@microhumus.fr](mailto:g.machinet@microhumus.fr).

2 : UNIVERSITA DEGLI STUDI DI FIRENZE (UNIFI), established in Piazza San Marco 4, Florence 50121, Italy.

3: UNIVERSITATEA BABES BOLYAI (UBB), established in MIHAIL KOGALNICEANU 1, CLUJ NAPOCA 400084, Romania.

4: STIFTELSEN NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT (NGI), established in SOGNSV 72, OSLO 0855, Norway.

5: OREBRO UNIVERSITY (ORU), established in FAKULTETSGATAN 1, OREBRO 70182, Sweden.

6: ENVIT, Pod lipami 35, 1218 Komenda, Slovenia.

7: Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Zürich, Switzerland.

8: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Netherlands.

9: KOBENHAVNS UNIVERSITET (UCPH), established in NORREGADE 10, KOBENHAVN 1165, Denmark.

**Key-words:** Soil remediation, pollution, PETCO, PFAS, OCB, metals, soil indicators, ecosystem restoration, ecosystem resilience modeling, decision support tool, restoration, biodiversity.

**Presentation objectives:**

The presentation aims to share the European Project ARAGORN (2023 - 2027) with stakeholders involved in the management and remediation of polluted sites and soils (academics, companies, landowners, public servants, or state representatives). The goal is to present the project's objectives and tools designed to achieve sustainable soil health.

**Innovation:**

The ARAGORN project adopts a holistic approach to guide the remediation and restoration of polluted sites by selecting the most effective remediation technic (physical, chemical, biological). It considers pollutants typologies, social aspects, ecological restoration, and financial implications.

**Abstract:**

Soil is a non-renewable and limited resource on a human timescale that must be carefully managed and protected. However, more than 60% of Europe soils are in an unhealthy state and need urgent actions due to the degradation of their functionality and the ecosystem services provided by these soils, such as food production, water filtration and support for biodiversity. Pollution, a major cause of soil degradation, is a global problem resulting from past and actual human activities (industrial, mining, smelter, agriculture ...) leading to environmental and health hazards. In Europe 2.8 million sites are reported as potentially polluted by various persistent pollutants such as PFAS, OCB, PETCO, and metals. PFAS pollution, in particular, is a rising challenge as we begin to measure its overall pollution and

adverse effects accurately, making it a major concern. The European Union, aware of these issues, has set an ambitious goal to achieve good soil health for 2050.

In this context, the ARAGORN project consortium (17 partners, 12 countries) aims to address the barriers to sustainable remediation and restoration of polluted soil in the European Union by providing sound recommendations. For that, the project is organized into complementary working axes:

- Mapping and monitoring tools: Advanced techniques for identifying contaminant hotspots, tracking their sources, and understanding their environmental fate.
- Comparing European standards: Cross-national evaluations of European standards for polluted soil and site management.
- Planning and decision tool: Developing robust frameworks to simulate remediation effectiveness and resilience outcomes.
- Remediation research: Investigating and optimizing technologies for PFAS and other persistent pollutant treatments.
- Guidance documents and platforms: Practical tools and recommendations to empower land managers across Europe to make informed, sustainable decisions.

By integrating technical expertise with socio-economic and ecological perspectives, ARAGORN seeks to shift from “regrettable remediation” to truly restorative approaches. Its outputs—decision trees, GIS-based planning tools, and resilience indicators—will enable stakeholders to prioritize effective and sustainable remediation strategies to manage environmental and health hazards while fostering biodiversity and climate resilience.

To achieve these objectives, especially to test and develop the tools and models, 9 polluted sites across Europe were selected by the consortium, according to their location, persistent pollutants, historical data, and past or planned remediation actions. These sites provide accurate input data from well-documented locations, including information on floristic and invertebrate biodiversity, environmental DNA, soil agronomics properties, pollutants concentrations in soil.

In France, two polluted sites by metal and organic pollutants were chosen with local reference sites (forest, meadow) serve as reference points for assessing ecological restoration. Soils from these sites were sampled to compare different remediation techniques (ReSoil, phytoremediation, bioremediation, immobilization, oxidation...) under laboratory conditions.

#### References:

ARAGORN Horizon (consulted the 25/11/2024). <https://aragorn-horizon.eu/the-project>.

## **Influence des activités microbiennes sur la mobilité, la biodisponibilité et la toxicité de l'arsenic et des métaux pour les plantes dans un déchet minier arsénié phytostabilisé**

### **Influence of microbial activities on the mobility, bioavailability, and toxicity of arsenic and metals for plants in arsenic-contaminated phytostabilized mining waste**

Marina Le Guédard<sup>1</sup>, Hugues Thouin<sup>2</sup>, Louis De Lary<sup>2</sup>, Nicolas Devau<sup>2</sup>, Lydie Le Forestier<sup>3</sup>, Hafida Tris<sup>2</sup>, Mickaël Charron<sup>2</sup>, Catherine Joulian<sup>2</sup>, Fabienne Battaglia-Brunet<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LEB Aquitaine Transfert – ADERA, CS20032, 33140, Villenave d'Ornon, France

<sup>2</sup> BRGM, Orléans, F-45060, France

<sup>3</sup> UMR 7327 Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, Université d'Orléans–CNRS/INSU–BRGM, 45071 Orléans, France

**Caractère innovant :** L'innovation du sujet repose sur l'analyse des changements physico-chimiques et microbiens des sols, susceptibles de modifier la mobilité des contaminants sur le long terme, ce qui pourrait affecter la pérennité du couvert végétal en phytostabilisation. L'intégration de ces paramètres dans un modèle de transfert réactif permettra de mieux comprendre et d'optimiser les stratégies de réhabilitation des sites miniers contaminés.

**Mots clés :** Gestion des déchets miniers, arsenic, phytostabilisation, mobilité des contaminants, biodisponibilité, bactéries du sol, cycles biogéochimiques, phytotoxicité, indicateurs de stress.

**Objectif du projet :** Analyser la mobilité de l'arsenic (As) et des métaux, ainsi que leur disponibilité pour les plantes, dans les massifs de déchets miniers phytostabilisés, en tenant compte des activités microbiennes, un facteur actuellement non intégré dans les modèles de prédiction.

**Résumé :** La gestion des déchets miniers constitue un défi environnemental majeur, et la phytostabilisation se présente comme une méthode prometteuse pour réhabiliter les sols contaminés. Son objectif est de maintenir un couvert végétal à long terme qui va dépendre de la capacité des plantes à se développer sur des substrats souvent riches en métaux et souvent défavorables à la croissance des plantes (pH acides et faible teneur en nutriments). Des amendements organiques et minéraux sont alors utilisés pour améliorer la qualité du sol, augmenter le pH, fournir des nutriments et réduire la mobilité des métaux, stimulant ainsi la croissance des plantes et l'activité biologique du sol. Toutefois, au fil du temps, ces amendements peuvent se dégrader, se modifier ou s'épuiser. Les bactéries réagissent à ces changements en adaptant leurs processus biologiques pour utiliser les ressources disponibles. Cette évolution microbienne peut influencer les cycles biogéochimiques du soufre (S), du fer (Fe), de l'arsenic (As) et des métaux, modifiant ainsi leur spéciation et leur biodisponibilité, ce qui peut affecter le développement et la survie des plantes phytostabilisatrices.

Dans le cadre du projet ANR « oMIMo », une expérimentation en pots sous serre a été mise en place sur une période de 2 ans. Les pots ont été remplis avec des résidus miniers contenant de l'arsenic (As) provenant des sites de Pontgibaud (Pb-Ag) et d'Abbaretz (Sn), mélangés avec un amendement composé de compost et de calcaire, et plantés ou non avec *Festuca rubra*, une plante herbacée phytostabilisatrice présente sur les deux sites. Tous les six mois des données expérimentales sont collectées, combinant l'évolution de la géochimie des eaux interstitielles (pH, Eh, conductivité et chimie, y compris la spéciation (AsIII et AsV) de l'As), les processus microbiens (nombre le plus probable (NPP) de procaryotes du sol oxydant ou réduisant l'As, le Fe et le S, la diversité de la communauté active) et la biodisponibilité et la toxicité de l'As et des métaux pour les plantes (teneur en As et en métaux dans les feuilles, marqueurs de stress et Indice Oméga-3). L'objectif final du projet est de construire un modèle de transfert réactif intégrant des paramètres microbiens pour aider les gestionnaires de sites miniers à définir les stratégies de dépollution via la phytostabilisation.

Après sept mois de développement des *Festuca rubra* sur les deux résidus amendés, les résultats montrent que les mécanismes de défenses (marqueurs de stress) sont activés chez les plantes, mais que les mécanismes spécifiques varient selon le résidu. Les membranes cellulaires semblent cependant rester stables (Indice Oméga-3), ce qui suggère que des mécanismes de compensation permettent de maintenir l'intégrité des membranes. En outre, les résultats montrent que la mobilité de l'As diffère selon le résidu : l'As, principalement sous forme AsV, est mobile dans le résidu d'Abbaretz mais pas dans celui de Pontgibaud. Enfin, une évolution de la diversité bactérienne, variant en fonction du résidu, a également été observée. Ces différences de mobilité de l'As et d'évolution bactérienne pourraient expliquer les variations dans les réponses physiologiques des plantes face au stress, en influençant la biodisponibilité et la toxicité de l'As et des métaux.

Marina Le Guédard

LEB Aquitaine Transfert – ADERA

71 avenue Edouard Bourlaux - CS20032,

33140 Villenave d'Ornon, France

[marina.le-guedard@u-bordeaux.fr](mailto:marina.le-guedard@u-bordeaux.fr)

## **Retour d'expérience : Évaluation du transfert des PFAS en zone non saturée et en zone saturée et stratégie de dépollution**

### **Feedback: Assessment of PFAS transfer in unsaturated and saturated zones and remediation strategy**

**Jérôme TEXIER<sup>1</sup>, Sara PETITJEAN<sup>1</sup>, Loïc ESNAULT<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> XSEM Environnement, 1225 Rte de l'Enfant, 13290 Aix-en-Provence  
[contact@xsem.fr](mailto:contact@xsem.fr)

**Mots-clés :** *PFAS, retour d'expérience, dépollution, bilan-cout-avantage, voies de transferts, modélisation*

**Objectifs :** Proposer un retour d'expérience sur la stratégie d'identification du risque de transfert d'une pollution PFAS à la fois en zone non saturée et en zone saturée et sur le choix des méthodes de traitements de dépollution. Mise en évidence des problématiques rencontrées et des solutions proposées.

**Caractère innovant du projet :** Proposition d'un retour d'expérience concernant un cas réel de chantier de dépollution d'un site pilote contaminé au PFAS (polluant émergent).

#### **Résumé :**

Les PFAS sont des polluants industriels omniprésents, présentant de graves risques pour la santé et l'environnement. Leur persistance et leur capacité à se disséminer dans les eaux souterraines et superficielles en font une préoccupation majeure. Nous proposons un retour d'expérience basé sur l'étude de dépollution d'un site atelier contaminé par les PFAS par dissémination de mousse anti-incendie. L'accent sera mis sur la caractérisation des voies de transfert des PFAS de la surface vers les sols et les eaux souterraines et la stratégie de dépollution mise en place sur la base de ces résultats. Ces éléments permettront d'apporter des réponses techniques à la question de : « traiter la contamination identifiée dans les sols ou la laisser en place ? ».

Des sondages de sols ont permis de déterminer les comportements de migration de différents PFAS identifiés au travers de milieux hétérogènes, comprenant des zones sableuses et argileuses. Sur la base de ces sondages, une estimation du stock a pu être réalisée. Le suivi des eaux souterraines a permis de mettre en évidence que la nappe était déjà impactée malgré un important stock présent dans la ZNS. Les modélisations numériques ont permis d'évaluer la mobilité associée à ce stock et son potentiel de migration hors site, où des cibles sensibles ont été identifiées. Les résultats de ces modélisations de la ZNS et de la ZS ont permis de déterminer que le risque était la dissémination d'un panache de dissous, car la contamination est caractérisée par des PFAS à chaîne courte connus pour leur mobilité (faible Kd). La composition de ce cocktail est un élément clé dans le choix de la méthode de traitement et dans la définition d'un bilan cout avantage. En raison du caractère mobile des polluants identifiés et qu'une partie de la contamination a déjà atteints la nappe (environ 30 %), il est important d'évaluer les possibilités de traitement disponible. Dans cette situation, la question se pose de laisser la contamination des sols se transférer vers la nappe et d'uniquement traiter la nappe. Cependant, ce scénario était associé à une durée de traitement plus important (>10 ans) et à un important risque de transfert hors site. Ainsi différents scénarii de traitement ont dû être comparés afin de déterminer une stratégie de dépollution adaptée.

Le retour d'expérience sur cette étude tend à apporter des informations techniques pour la gestion des sites contaminés par les PFAS, en mettant en avant notre approche méthodologique, basée sur le couplage acquisition de données terrain zones sources / modélisation numérique pour être à même d'identifier les méthodes et stratégies de traitement adaptées, de discuter de paramètres critiques temps et risques de transfert, le choix des seuils et des moyens de dépollution disponibles à ce jour et contribuer à des solutions pratiques et durables pour la gestion des risques environnementaux liés aux PFAS.

*Comportement environnemental de quelques polluants importants des PFAS et des Amines aromatiques du type Benzidine*

*Environmental Behavior of some Key-PFAS and Aromatic Amine Pollutants of Benzidine Type*

**Dr. Frank Karg: Scientific Director of HPC-Group (INOGEN JV) & President-CEO of HPC INTERNATIONAL / France & Germany**  
**Email: [frank.karg@hpc-international.com](mailto:frank.karg@hpc-international.com) / Phone: +33 607 346 916**

**HPC INTERNATIONAL**  
**Hôtel de Recherche / Centre Médical de Perharidy / 29 680 Roscoff - France**

PFAS and aromatic Amines have strange behaviors in the environment. Concerning some environmental effects, they are similar in chemical reactions. A comparison is done between some key PFAS products e.g. 6:2-FTAB and Benzidine. Both pollutants are for ex. present in contaminated groundwater under influence of (hazardous waste) Landfill leachates.

PFAS in general are endocrine disruptor, showing also lots of other toxic effects. Poly-fluorinated PFAS are bio-transformed into per-fluorinated PFAS. Especially 6:2-FTAB is present in Anti Fire Fighting Foams (AFFF) and other products. In AFFFs the 6:2-FTAB is sometimes present up to 70 % of total PFAS. Intermediary microbiological 6:2-FTAB transformation metabolites are 6:2-FTS, 6:2-FTOH, PFBA, PFPeA and PFHxA. Some chemical effects are very similar between PFAS and aromatic amines, like Benzidine; This is the fact of azo-polarization in acid pH conditions, which ensures much higher adsorption in substrata like soil and sediments in aquifers. In this case concentrations are rising strongly up, with factors > 10 (cf. also F. Karg et al. 2024).

In case of alkaline pH, both pollutant groups (aromatic amines and Sulfo-betaine PFAS), like 6:2-FTAB and Benzidine are showing much lower adsorption rates and re-leaching into groundwater.

The figure 1 shows the microbiological biotransformation of 6:2-FTAB into 6:2-FTS, 6:2-FTOH, PFBA, PFPeA and PFHxA (according LaFond et al. 2023, D.M.J. Shaw et al. 2019, Ying Shi, 2018 and V. Mendeza et. al. 2022).

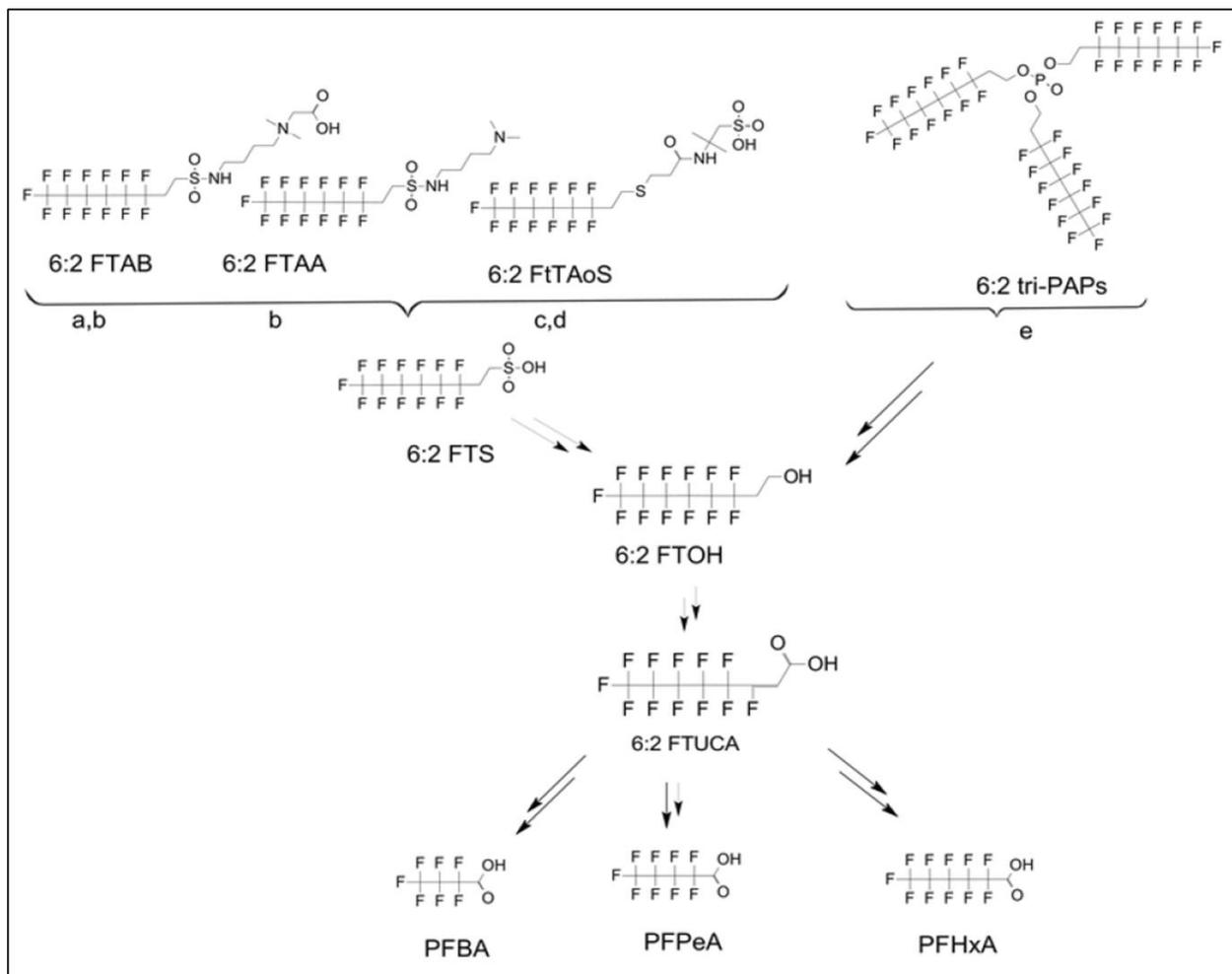


Figure 1: Microbiological biotransformation of 6:2-FTAB into 6:2-FTS, 6:2-FTOH, PFBA, PFPeA and PFHxA (according LaFond et al. 2023, D.M.J. Shaw et al. 2019 ,Ying Shi, 2018 and V. Mendez et. al. 2022).

Aromatic amines are used for production of Textiles & Leather Azo-Dyes, Paper Pigments, Inks, Rubbers, Plastics, Cutting oils, Pesticides, Cosmetics, etc.

Aromatic amines are well-established as causes of Bladder Cancer and one of the first Carcinogens to be associated with an occupational exposure.

Environmental Pollution by aromatic amines in soil and Surface- & Ground-water are based principally and Dye Waste Landfills, Wastewaters, Textile & Paper Production. Human Exposure is principally based on Food, drinking water, air, clothes and cosmetics.

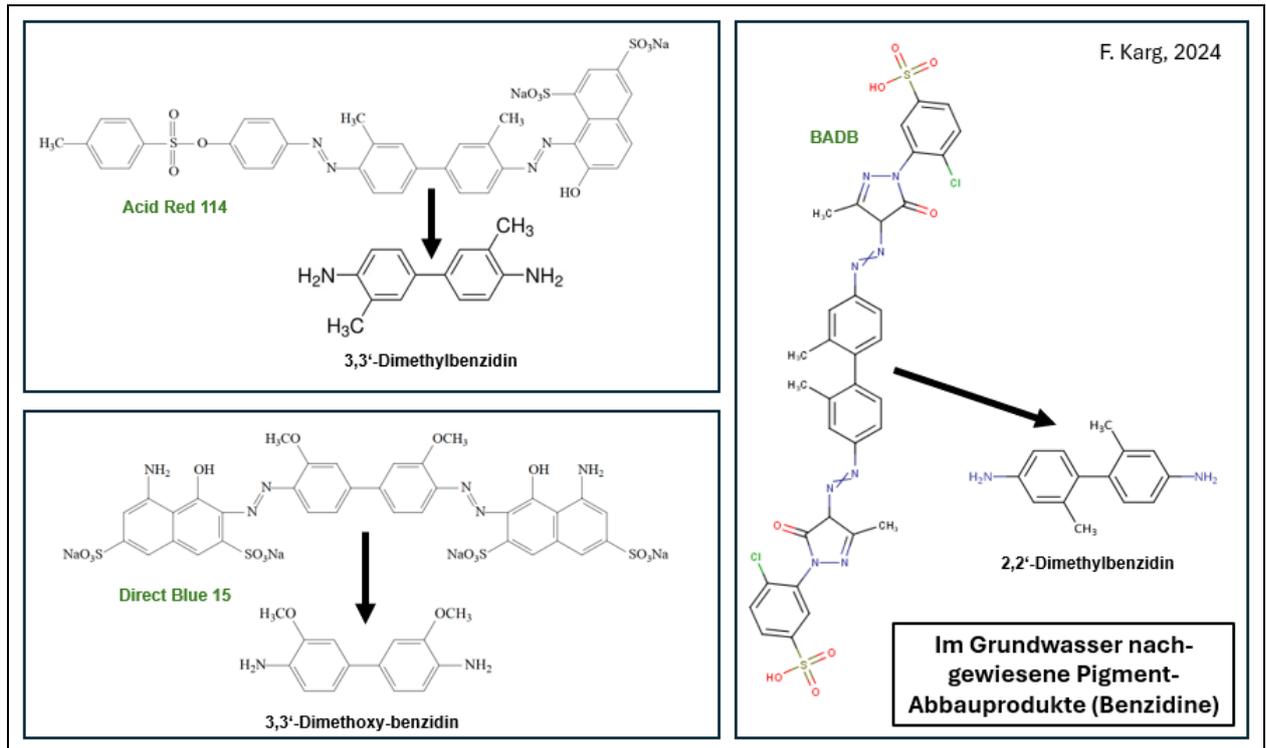


Fig. 2: Textile Dye Products and their degradation into different typical Benzidines.

Benzidine is very well known from the production of azo-dyes and as metabolite from azo dye degradation. The fact of Benzidine's strong carcinogenicity stopped in the 1980ies & 1990ies the production of Benzidine based azo-dyes and pigments. Subsequent microbiological degradation of Benzidine produces several metabolites with toxicological importance.

Some of these metabolites must be considered for site investigations, risk assessments and groundwater monitoring and remediation. The Fig. 2 shows Textile Dye Products and their degradation into different typical Benzidines.

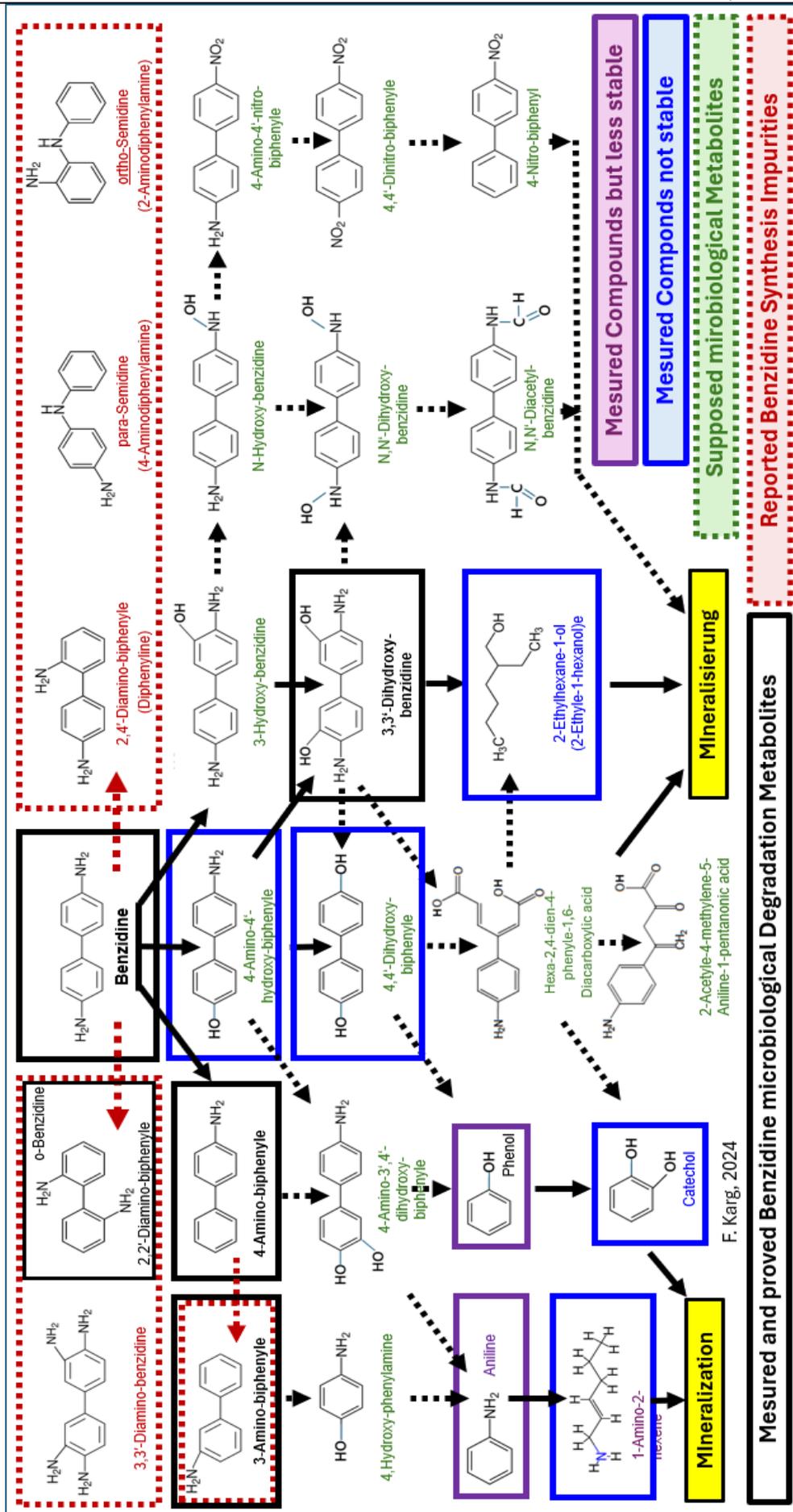


Figure 3: Microbiological degradation of Benzidine into stable and non-stable Metabolites

Benzidine is very known from the production of azo-dyes and as metabolite from azo dye degradation. The fact of Benzidine's strong carcinogenicity stopped in the 1980ies & 1990ies the production of Benzidine based azo-dyes and pigments. Subsequent microbiological degradation of Benzidine produces several metabolites with toxicological importance. Some of these metabolites have to be considered for site investigations, risk assessments and groundwater monitoring and remediation.

The figure 3 shows the microbiological degradation of Benzidine into stable and non-stable metabolites (according F. Karg et al. 2024). The figure 3 shows the Benzidine's and 6:2-FTAB's comparable behavior in case of hydro-chemical pH changing (according F. Karg et al. 2024). Under alkaline pH the absorbability of sulfon-amido-betaines, like 6:2-FTAB and aromatic amines, like Benzidine are much higher than under acid pH conditions in Aquifer and groundwater. Acid pH effects are the up-rising to much higher concentrations in groundwater.

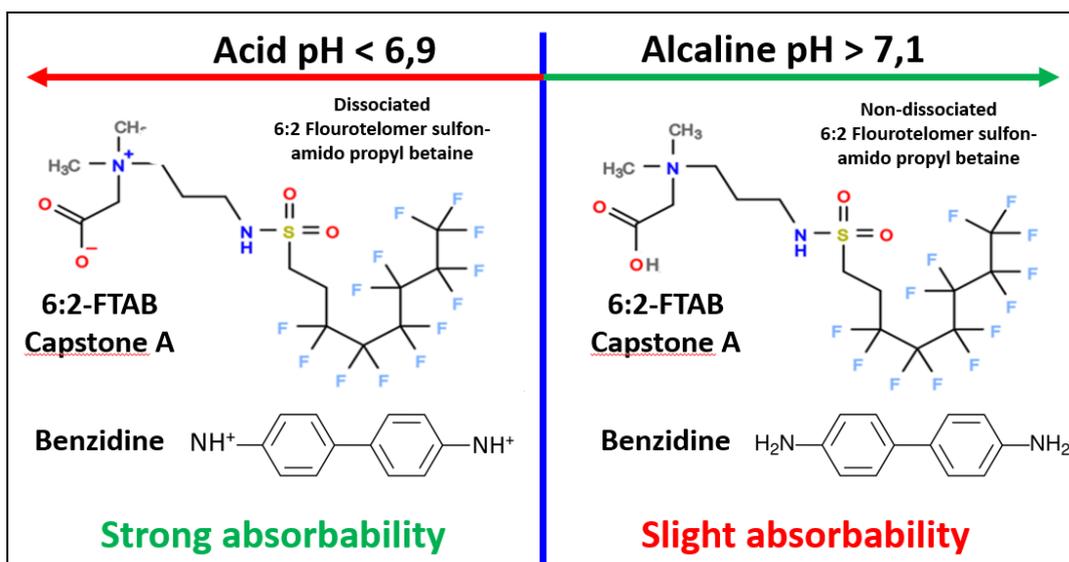


Figure 3: Benzidine's and 6:2-FTAB's comparable behavior in case of hydro-chemical pH changing.

### Conclusion:

Concerning contaminated site (Groundwater, Soil, Surface waters and sediments) investigations, risk assessments and remediation it must be considered, that under alkaline pH the absorbability of sulfon-amido-betaines like 6:2-FTAB and aromatic amines, like Benzidine are much higher than under acid pH conditions in Aquifer and groundwater. Alkaline conditions are leading to desorption and higher concentrations in water. Samples should be extracted under alkaline conditions before analyses to ensure best recovery rates.

## References:

1. Hatice, A. E. "Biodegradation of azo dyes. Handbook of environmental chemistry. Springer, London (2010).
2. Saratale, R.G.; Saratale, G.D.; Chang, J.S.; Govindwar, S.P. Bacterial decolorization and degradation of azo dyes: A review. J. Taiwan Inst. Chem. Eng. 2011, 42, 138–157. [CrossRef]
3. Sciarini, Louis J., 3-Hydroxybenzidine, a metabolite of benzidine, Archives of Biochemistry and Biophysics, Volume 71, Issue 2, October 1957, Pages 437-441.
4. Singh, S.; Pakshirajan, K. Enzyme activities and decolourization of single and mixed azo dyes by the white-rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*. Int. Biodeterior. Biodegrad. 2010, 64, 146–15.
5. Bhattacharya, S.; Das, A. Mycoremediation of Congo red dye by filamentous fungi. Braz. J. Microbiol. 2011, 42, 1526–1536.
6. Dias, A.A.; Lucas, M.S.; Sampaio, A.; Peres, J.A.; Bezerra, R.M. Decolorization of azo dyes by yeasts. In Biodegradation of Azo Dyes; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2010; pp. 183–193.
7. Ngo, A.C.R.; Devanadera, M.K.P.; Dedeles, G.R. Decolorization of selected synthetic textile dyes by yeasts from leaves and fruit peels. J. Health Pollut. 2016, 6, 42–55.
8. Shetty, K.; Krishnakumar, G. Algal and cyanobacterial biomass as potential dye biodecolorizing material: A review. Biotechnol. Lett. 2020, 42, 2467–2488.
9. El-Sheekh, M.M.; El-Shanshoury, A.R.; Abou-El-Souod, G.W.; Gharieb, D.Y.; El Shafay, S.M. Decolorization of dyestuffs by some species of green algae and cyanobacteria and its consortium. Int. J. Environ. Sci. Technol. 2021, 18, 3895–3906.
10. Ghodake, G.; Jadhav, U.; Tamboli, D.; Kagalkar, A.; Govindwar, S. Decolorization of textile dyes and degradation of mono-azo dye amaranth by *Acinetobacter calcoaceticus* NCIM 2890. Indian J. Microbiol. 2011, 51, 501–508.
11. Shah, M.P.; Patel, K.A.; Nair, S.S.; Darji, A.M. Microbial decolourization of methyl orange dye by *Pseudomonas* spp. OA Biotechnology 2013, 2, 10.

12. Haque, M.M.; Haque, M.A.; Mosharaf, M.K.; Marcus, P.K. Decolorization, degradation and detoxification of carcinogenic sulfonated azo dye methyl orange by newly developed biofilm consortia. *Saudi J. Biol. Sci.* 2021, 28, 793–804.
13. Kumar, Koel, et al. "Decolorisation, biodegradation and detoxification of benzidine based azo dye." *Bioresource technology* 97.3 (2006): 407-413.  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15936944/>
14. Bafana, Amit, et al. "Detoxification of benzidine-based azo dye by *E. gallinarum*: Time-course study." *Ecotoxicology and environmental safety* 72.3 (2009): 960-964.  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18206233/>
15. Lade, H., Kadam, A., Paul, D., & Govindwar, S. (2015). A Low-Cost Wheat bran medium for biodegradation of the benzidine-based carcinogenic dye Trypan Blue using a microbial consortium. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(4), 3480-3505.
16. Balapure, K.H.; Jain, K.; Chattaraj, S.; Bhatt, N.S. Madamwar, D. Co-metabolic degradation of diazo dye- reactive blue 160 by enriched mixed cultures BDN. *J. Hazard. Mater.* 2014, 279, 85–95.
17. [https://zueblin-umwelttechnik.com/databases/internet/\\_public/files30.nsf/SearchView/CCD4029139948A4CC12586D1002CE5DD/\\$File/PAGE-18756.pdf](https://zueblin-umwelttechnik.com/databases/internet/_public/files30.nsf/SearchView/CCD4029139948A4CC12586D1002CE5DD/$File/PAGE-18756.pdf)
18. Haley, Thomas J., *Metabolism and Pharmacokinetics of Benzidine and its Congeners in man and animals*, department of Health and Human Services Food and Drug Administration, National Center of Zoxicological Research Jefferson, Arkansas 72079, *Drug Metabolism Reviews*, 13(3), 473 – 483 (1982).
19. Eintrag zu Azofarbstoffen, die durch reduktive Azospaltung Benzidin freisetzen können in der GESTIS-Stoffdatenbank des IFA, abgerufen am November 2024.  
<https://gestis.dguv.de/data?name=531468>.

20. Fahrig, R.; Görlitz, B.-D.; Preiß, A. (2003): Prüfung der genotoxischen Wirkung von 3,3"-Dihydroxybenzidin einschließlich Untersuchungen zur Stabilität. 1. Auflage. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft GmbH, 2003. (Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Forschungsbericht , Fb 975). ISBN: 3-89701-932-9, Seiten: 196, Projektnummer: F 1653, Papier.  
<https://www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Schriftenreihe/Forschungsberichte/2003/Fb975.html>
21. Joel Harden, Amy Jewell, Francis P. Donaldson, Marianne C. Nyman (2009): Benzidine transformation processes in natural sediments. Environmental Toxicology and Chemistry. Volume 25, Issue 8 p. 1969-1974.  
<https://setac.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1897/05-274R.1>  
<https://doi.org/10.1897/05-274R.1>
22. CEPA: Canadian Environmental Protection Act (1993): Priority Substances List Assessment Report: Benzidine. [https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/migration/hc-sc/ewh-semt/alt\\_formats/hecs-sesc/pdf/pubs/contaminants/psl1-lsp1/benzidine/benzidine-eng.pdf](https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/migration/hc-sc/ewh-semt/alt_formats/hecs-sesc/pdf/pubs/contaminants/psl1-lsp1/benzidine/benzidine-eng.pdf)
23. Graveel, J.G., L.E. Sommers, and D.W. Nelson (1986): Decomposition of benzidine,  $\alpha$ -naphthylamine and p-toluidine in soils. J. Environ. Qual. 15: 53–59  
<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/jeq1986.0047242500150010013x>
24. Graveel, J.G., L.E. Sommers, and D.W. Nelson (1985): Sites of benzidine,  $\alpha$ -naphthylamine and p-toluidine retention in soils. Environ. Toxicol. Chem. 4: 607–613.
25. Lu, P.-Y., R.L. Metcalf, N. Plummer, and D. Mandel (1977): The environmental fate of three carcinogens: benzo(a)pyrene, benzidine and vinyl chloride evaluated in laboratory model ecosystems. Arch. Environ. Contam. Toxicol. 6: 129–142.  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20063/>

26. Baird, R.; Carmona, L.; Jenkins, R.L. (1977): Behavior of benzidine and other aromatic amines in aerobic waste water treatment. *Journal Water Pollution Control Federation* 49(7): 1609-1615.  
<https://eurekamag.com/research/004/814/004814760.php>
27. CAROLYN D. LYONS, STANLEY KATZ, AND RICHARD BARTHA (1984): Mechanisms and Pathways of Aniline Elimination from Aquatic Environments. *APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY*, Sept. 1984, p. 491-496.  
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC241554/pdf/aem00154-0039.pdf>
28. Environnement Canada / Santé Canada (1993) : Liste des substances d'intérêt prioritaire. Rapport d'évaluation Benzidine. ISBN: 0-662-98537-0, No de catalogue : MAS En40-215/20F  
[https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/sante-environnement-milieu-travail/rapports-publications/contaminants-environnementaux/loi-canadienne-protection-environnement-liste-substances-interet-prioritaire-rapport-evaluation-benzidine.html#a2\\_2](https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/sante-environnement-milieu-travail/rapports-publications/contaminants-environnementaux/loi-canadienne-protection-environnement-liste-substances-interet-prioritaire-rapport-evaluation-benzidine.html#a2_2)
29. Tabak, H.H. et E.F. Barth. «Biodegradability of benzidine in aerobic suspended growth reactors», *J. Water Pollut. Contr. Fed.*, no 50, 1978, p. 552-558.  
<https://www.jstor.org/stable/25039583>
30. Freitag, D., L. Ballhorn, H. Geyer et F. Korte. «Environmental hazard profile for organic chemicals. An experimental method for the assessment of the behaviour of organic chemicals in the ecosphere by means of simple laboratory tests with <sup>14</sup>C-labelled chemicals », *Chemosphere*, no 14, 1985, p. 1589-1616.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0045653585900141?via%3Dihub>
31. Callahan, M.A., M.W. Slimak, N.W. Gabel, I.P. May, C.F. Fowler, J.R. Freed, P. Jennings, R.L. Durfee, F.C. Whitmore, B. Maestri, W.R. Mabey, B.R. Holt & C. Gould (1979): Water-related environmental fate of 129 priority pollutants, vol. II, Halogenated aliphatic hydrocarbons, halogenated ethers, monocyclic aromatics, phthalate esters, polycyclic aromatic hydrocarbons, nitrosamines and miscellaneous compounds, Environmental Protection Agency des É.-U., Washington (EPA 440/4-79-029b), 1979.

32. Syracuse Research Corp. (1989): Chemical fate rate constants for SARA Section 313 chemicals and Superfund health evaluation manual chemicals, rapport (EPA 68-02-4254, Versar Task 176, SRC F0107-10, EPA 68-C8-0004, SRC F0111-119) préparé pour l'Environmental Protection Agency des É.-U., Office of Toxic Substances, Washington, 1989, p. 267-268.
33. Zierath, D.L., J.P. Hassett, W.L. Banwart, S.G. Wood et J.C. Means. «Sorption of benzidine by sediments and soils», *Soil Sci.*, no 129, 1980, p. 277-281.
34. Santé Canada (2017): Évaluation préalable Groupe de substances azoïques aromatiques et à base de benzidine - Certains colorants azoïques dispersés.  
[https://www.canada.ca/content/dam/eccc/migration/ese-ees/e86c5afa-ec64-4b93-bc4d-ceb642bf3105/fsar\\_pkg2-20-20azo-20disperse-20dyes\\_fr-202017\\_03\\_09-20final.pdf](https://www.canada.ca/content/dam/eccc/migration/ese-ees/e86c5afa-ec64-4b93-bc4d-ceb642bf3105/fsar_pkg2-20-20azo-20disperse-20dyes_fr-202017_03_09-20final.pdf)
35. Kumar, K., Devi, S., Krishnamurthi, K., Gampawar, S., Mishra, N., Pandya, G., & Chakrabarti, T. (2005). Decolorisation, biodegradation and detoxification of benzidine based azo dye, *Bioresource Technology*, 97, 407–413.  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15936944/>
36. Shedbalkar U, Dhanve R, Jadhav J (2008) Biodegradation of triphenylmethane dye Cotton blue by *Penicillium ochrochloron* MTCC 517. *J Hazard Mater* 157:472–479
37. ATSDR (2001): TOXICOLOGICAL PROFILE FOR BENZIDINE. U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES. Public Health Service. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, September 2001.  
<https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp62.pdf>
38. Muneer, M, Singh, H., K., Bahnemann, D. (2002): Semiconductor-mediated photocatalysed degradation of two selected priority organic pollutants, benzidine and 1,2-diphenylhydrazine, in aqueous suspension. *Chemosphere*, Volume 49, Issue 2, October 2002, Pages 193-203.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004565350200190X>
39. HSDB. (2005) - "Hazardous Substances Data Bank." from.  
<http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/htmlgen?HSDB>

40. Eberhard Breitmaier, Günther Jung: Organische Chemie: Grundlagen, Verbindungsklassen, Reaktionen, Konzepte, Molekülstruktur, Naturstoffe, Synthesepanung, Nachhaltigkeit Vol. 7. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2012, S. 379–380; 453. <https://de.wikipedia.org/wiki/Spezial:ISBN-Suche/9783135415079>
41. Otto-Albrecht Neumüller (Herausgeber): Römpps Chemie Lexikon 8. Auflage, Frank'sche Verlagshandlung, Stuttgart, 1983, S. 4704. <https://de.wikipedia.org/wiki/Spezial:ISBN-Suche/3440045137>
42. Bradford P. Mundy, Michael G. Ellerd, Frank G. Favaloro Jr.: *Name Reactions and Reagents in Organic Synthesis, Second Edition*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005, [ISBN 9780471739876](https://www.wiley.com/ISBN/9780471739876), S. 84–85, [doi:10.1002/9780471739876](https://doi.org/10.1002/9780471739876).
43. T. Laue, A. Plagens: *Namen- und Schlagwort-Reaktionen* 4. Auflage, Teubner, Wiesbaden, 2004, [ISBN 3-519-33526-3](https://www.teubner.de/ISBN/3-519-33526-3), S. 40–42.
44. A. Hassner, I. Namboothiri: *Organic Syntheses Based on Name Reactions A practical guide to 750 transformations*, Elsevier Ltd, Amsterdam, 2012, [ISBN 978-0-08-096630-4](https://www.elsevier.com/ISBN/9780080966304), S. 543.
45. Puvaneswari, N., Muthukrishnan, J., Gunasekaran, P. (2002): Biodegradation of benzidine based azodyes Direct red and Direct blue by the immobilized cells of *Pseudomonas fluorescens* D41. *Indian J Exp Biol.* 2002 Oct;40(10):1131-6. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12693692/>
46. Valentina Méndeza, Sophie Holland, Shefali Bhardwaja, James McDonalda, Stuart Khan, Denis O'Carroll, Russell Pickford, Sarah Richards, Casey O'Farrell, Nicholas Coleman, Matthew Lee, Michael J. Manefield (2022) : Aerobic biotransformation of 6:2 fluorotelomer sulfonate by *Dietzia aurantiaca* J3 under sulfur-limiting conditions. *Science of the Total Environment* 829 (2022) 154587.
47. Dayton M.J. Shaw, Gabriel Munoz, Eric M. Bottos, Sung Vo Duy, Sébastien Sauv , Jinxia Liu, Jonathan D. Van Hamme (2019): Degradation and defluorination of 6:2 fluorotelomer sulfonamidoalkyl betaine and 6:2 fluorotelomer sulfonate by *Gordonia* sp. strain NB4-1Y under sulfur-limiting conditions. *Chemosphere* Volume 647, 10 January 2019, Pages 690-698.

48. Ying SHI (2018) : BACTERIAL DESULFONATION AND DEFLUORINATION OF 6:2 FLUOROTELOMER SULFONATE (6:2 FTS). Submitted to the Office of Graduate and Professional Studies of Texas A&M University.
49. LaFond, Jessica A., Paul B. Hatzinger, Jennifer L. Guelfo, Kayleigh Millerick and W. Andrew Jackson (2023) : Department of Civil, Environmental & Construction Engineering, Texas Tech University, Lubbock, TX 79409, USA. Royal Society of Chemistry. DOI: 10.1039/D3VA00031A (Tutorial Review) Environ. Sci.: Adv., 2023, 2, 1019-1041.  
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2023/va/d3va00031a>
50. Heilier, J.F., Rousselle, C., Karg, F., Ronga, S., Charlate, P., Pouzaud, F., Robin-Vigeron, L. (2023 + 2024) : Evaluation et Gestion des PFAS : 9. Toxicité et Valeurs Toxicologiques de Référence. Guide de Gestion des PFAS de la SFSE : Société Francophone de Santé et Environnement. Mise en ligne, le 27/11/2023.  
<https://sfse.wetransfer.com/downloads/e193f037a0dcb952f56e28b7e58a989220231123142128/f19c7b>
51. Karg, F., Heilier, J.-F., Ronga-Pezeret, S., Rousselle, C., Bouhoulle, E., Robin-Vigeron, L. (2023 + 2024) : Evaluation et Gestion des PFAS : 10. Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires et mélanges. Guide de Gestion des PFAS de la SFSE : Société Francophone de Santé et Environnement. Mise en ligne, le 27/11/2023.  
<https://sfse.wetransfer.com/downloads/e193f037a0dcb952f56e28b7e58a989220231123142128/f19c7b>
52. Karg, F. (2024): Evaluation des risques sanitaires d'une multitude des PFAS par application des Top Assays sur les substances polyfluorés (Précurseurs). Health Risk Assessments for large PFAS Cocktails by Application of the Top Assays concerning the poly-fluoro Substances (Precursors). Congress-Manuscript for the INTERSOL Congress at 26-28 March 2024 in Paris.  
[https://www.saturne.net/mud/index.php?d=intersol2024\\_pg\\_abstracts](https://www.saturne.net/mud/index.php?d=intersol2024_pg_abstracts)

53. Karg, F. (2024): PFAS-Source Identification and Differentiation in Environmental Pollution by use Multi Vector Analysis (MVA) on artificial Intelligence Basis – Application on standard Soil & Water Analysis. Identification et différenciation des sources des PFAS dans les pollutions environnementaux grâce à l'analyse multi-vecteurs (MVA) sur la base de l'intelligence artificielle - Application à l'analyse standard du sol et de l'eau. Congress-Manuscript for the International PFAS-Congress at 04 – 06 June 2024 in Paris. PFAS24\_ABSTRACTS\_PG.pdf
54. Karg, F. (2024): Integrated PFAS Quantitative Health Risk Assessments via TERQ (Toxicological Exposure Risk Quantification) by use of Top Assay Analysis for integration of the large Mass of poly-flourinated Alkyl Substances. Évaluations quantitatives des risques pour la santé des PFAS via des EQRS, en application des Analyses du Top Assay pour l'intégration de la grande masse de substances alkyles polyfluorées. Congress-Manuscript for the International PFAS-Congress at 04 – 06 June 2024 in Paris. PFAS24\_ABSTRACTS\_PG.pdf
55. Karg, F. (2024): Advanced in-situ Remediation of PFAS by application of in-situ Washing with Proteinic Bio-Polymers. Dépollution in situ avancée des PFAS par application d'un lavage in situ via des Bio-polymères protéiques. Congress-Manuscript for the International PFAS-Congress at 04 – 06 June 2024 in Paris. PFAS24\_ABSTRACTS\_PG.pdf
56. Karg, F. (2024): International Experiences and inovative PFAS Management in Germany: Health Risk Assessment &PFAS Pollution Sources identification and Differentiation / Internationale Erfahrungen und innovatives PFAS-Management in Deutschland: PFAS Source Differentiation and site specific Health Risk Assessments for sustainable site remediation. PFAS-Quellendifferenzierung sowie Einzelbewertung der Vielstoffbelastungen gemäß BBodSchV § 15.4. für verhältnismäßige Sanierungen unter Berücksichtigung der flüchtigen Fluortelomeralkohole (FTOH). Congress-Document for Karlsruher Altlasten-PFAS-Seminar - Perflursan-Workshop / Germany: 18/06/2024. ICP perflusan (icp-ing.de)

57. Karg, F. (2024): Die Bedeutung der Identifizierung und Differenzierung von PFAS-Quellen im Grundwasser mittels Multi-Vektor-Analyse / Importance of Identification & Differentiation of PFAS Contaminations Source via Multi-Vector Analysis on Artificial Intelligence Basis. Seminar BEW - Duisburg / Germany. 06/09/2024.
58. Karg, F. (2024): Measurements and Health Risk assessments of volatile PFAS in indoor Ambient Air (FTOH: Fluortelomere alcohols, etc.). Progress concerning work relating to Nurseries and Schools in Rhône-Alpes / France: Choice and application of TRV\*, Space-Time Budgets, Respiration Rates, etc. for volatile PFAS & COHV, etc.) (\* Toxicological Reference Values). Congress-Manuscript ATMOSFAIR Lyons, 22-23/10/2024.  
[https://www.saturne.net/mud/index.php?d=atmosfair2024\\_october\\_9](https://www.saturne.net/mud/index.php?d=atmosfair2024_october_9)
59. Karg, F. (2024) : PFAS-Quellen Identifizierung & Differenzierung via AI-MVA (Multi-Vektor-Analyse auf Basis von künstlicher Intelligenz). Symposium Script. BAFU Atlas-ten Symposium (Bundesamt für Umwelt), 31.10.2024. Solothurn – Schweiz / Switzerland.  
<file:///C:/Users/fka/Downloads/Symposium%202024%20Pr%C3%A4sentationen-1.pdf>
60. Karg, F. (2024): Evaluation des risques toxicologiques dans le cas des multi-expositions aux PFAS poly- & perfluorés, via l’application des Top Assays sur les substances polyfluorés (Précurseurs). Document du Congrès de Toxicologie de la SFT : Société Française de Toxicologie, Lyon 14 – 15/11/2024.  
<https://www.sftox.com/index.php/actualites/congres>
61. Karg, F. (2024) : PFAS : Évaluation des Risques toxicologiques (EQRS) avec la prise en compte des précurseurs & métabolites stables et expériences et applications conforme au Guide de Gestion des PFAS de la SFSE / Toxicological Exposure Risk Assessment (TERQ) considering stable Precursors & Metabolites and expériences & applications in compliance to the SFSE’s PFAS Management Guideline. Congrès de la SFSE : Société Francophone de Santé et Environnement. Paris 21/11/2024. Seminar Script.  
<https://www.sfse.org/congres/presentations/21>

## **TOWARDS AN INTEGRATED STRATEGY FOR ENVIRONMENTAL DATA MANAGEMENT: HARMONIZING SOIL GAS DATA EXCHANGE**

**26-03-2025 - INTERSOL LYON 2025 – Theme : 3 - Health and environmental risk assessments**

In France, standards such as NF X 31-620 provide detailed guidelines for soil gas sampling. Practical guides produced by organizations such as BRGM and INERIS further reinforce these practices to ensure high-quality results. However, while these standards effectively regulate field practices, a **standardized digital data exchange protocol** to facilitate communication between laboratories, consultants, and even data managers is still **missing**.

**TerraIndex**, in partnership with laboratories such as SGS, Agrolab, Eurofins, and Wessling, relies on the **SIKB 0101**<sup>1</sup> environmental data exchange standard for its data communication processes, including field data and laboratory analysis results. While this standard has proven effective for soil and water matrices, the air and soil gas matrix - historically less used in environmental diagnostics in the Netherlands - has only been partially integrated into the SIKB 0101 format.

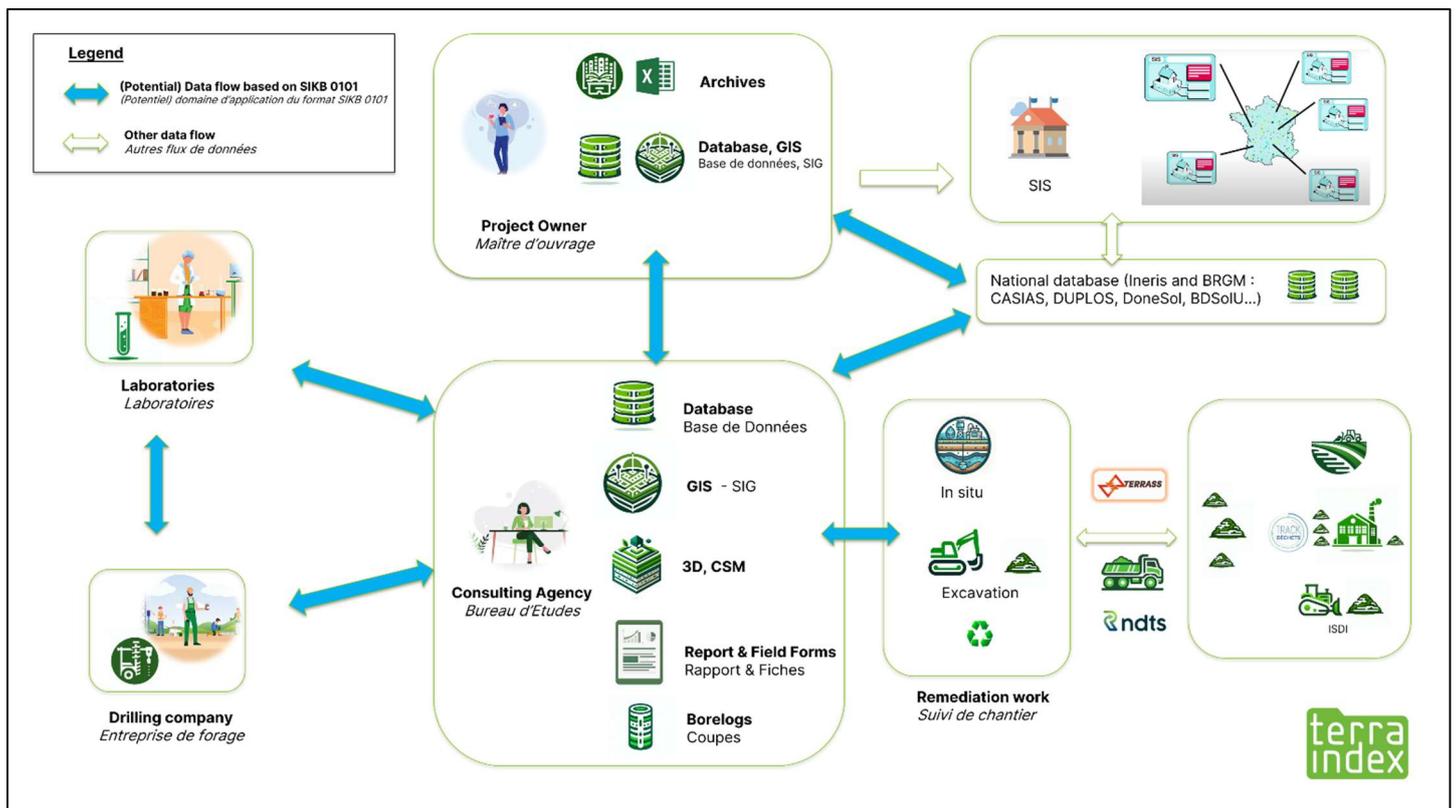


Figure 1: **Potential** domains of application of the SIKB 0101 exchange format within the French SSP data flows

<sup>1</sup> <https://www.sikb.nl/over-sikb/about-sikb>

The goal is to design a commercially neutral format capable of supporting the work process of environmental consulting agencies through enabling (1) the capture and digital exchange of field data specific to soil gas and ambient air sampling, (2) the transmission of references and characteristics of sampling media, and (3) the submission of laboratory analysis orders and (4) the reception of results.

The goal is to deliver a robust solution tailored to the operational and regulatory needs of French SSP professionals while anticipating European interoperability.

### Challenges

The primary challenge lies in the variability of laboratory workflows and data requirements. Laboratories employ diverse methods for soil gas sampling and analysis, necessitating a data exchange protocol that is both flexible and standardized. Achieving this balance is essential to ensure widespread adoption, while considering commercial interests, as laboratories seek to maintain distinctive approaches to best serve their clients.

Another significant challenge is the adaptation of the SIKB 0101 standard. Initially designed for and by the Dutch market, and driven by actors on the field, it did not initially account for soil gas matrices. Furthermore, several versions of the SIKB 0101 co-exist and not every actors use the latest one.

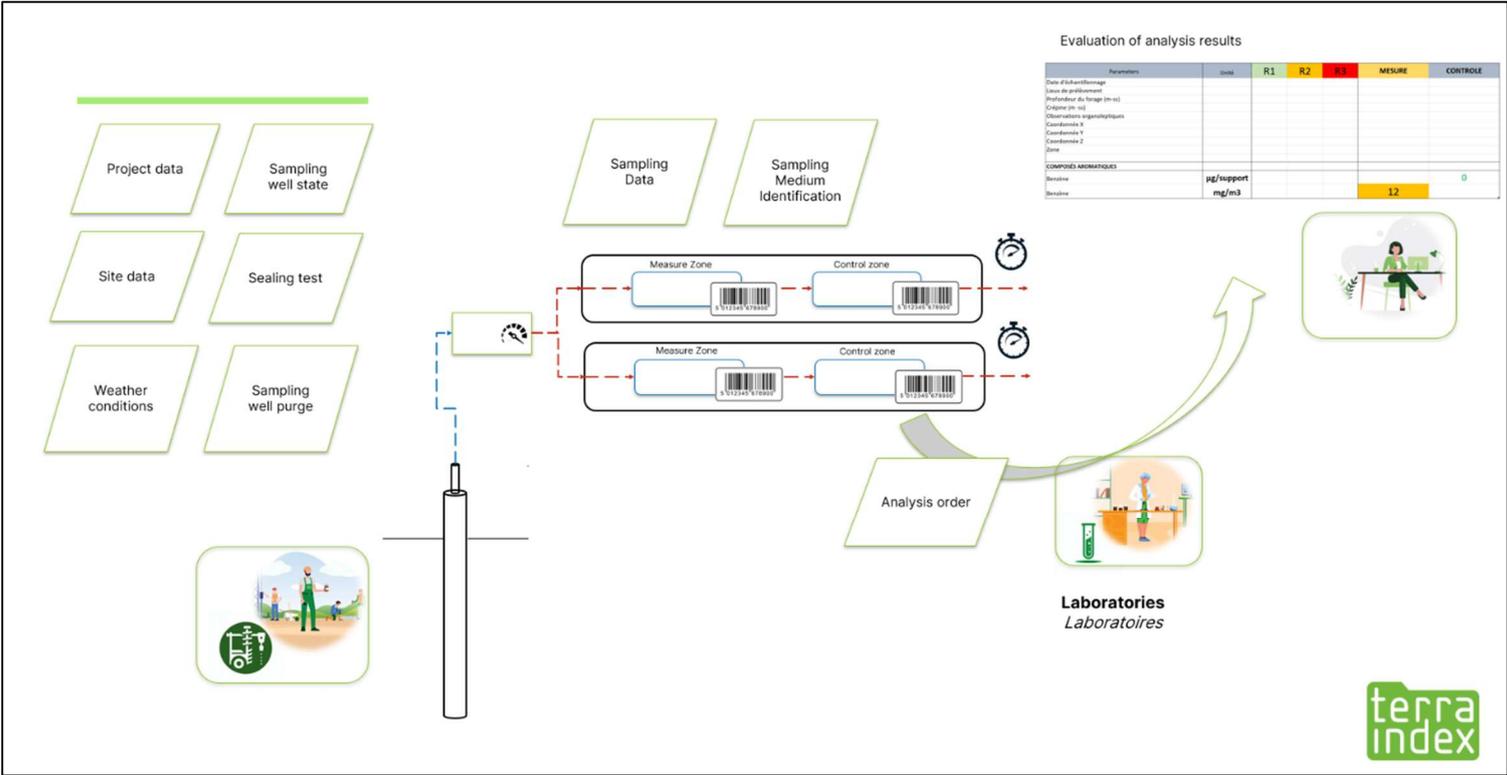


Figure 2: Data flow within the Soil Gas sampling process

## **Objectives and Added Value**

The project primarily aims to establish a practical protocol for soil gas data exchange. This framework addresses a clear need in France while complementing existing exchange standards.

For SSP (*Sites et Sols Pollués*) consultants, improved workflows will simplify data collection during soil gas sampling, facilitate the transfer of data for analysis orders, and support the effective interpretation and integration of results into site diagnostics. This enables more efficient investigations and better-informed decision-making for remediation projects.

For laboratories, the project could streamline data exchange processes, reducing inefficiencies and improving the accuracy of orders. Indirectly, laboratory processes are seamlessly integrated into the workflows of consulting firms.

For data managers and public or private SSP database administrators, the project could ultimately result in the creation of a comprehensive and functional format that enables easier data exchanges, independent of the source of the data.

## **Lessons Learned**

The lessons learned will provide a foundation for extending the SIKB 0101 standard to other underrepresented matrices, ensuring its relevance in diverse markets. These findings will be shared as a return of experience (REX) at INTERSOL 2025.

## **Fabrication de terre fertile sur site, comment évaluer les risques sanitaires et environnementaux ?**

### **Manufacture of fertile soil on site, how to assess the health and environmental risks?**

#### **Résumé**

L'intervention mettra en lumière la production de terre fertile directement sur site, dans le cadre d'un grand projet de reconversion de site industriel.

L'objet sera de réaliser un retour d'expérience sur les contraintes liées à la production de terre végétale dans le cadre d'un projet de construction et les conditions à respecter pour garantir son utilisation, en lien avec l'usage futur du site.

Intervenant :

Olivier Pacaud - Direction Centre Sud-Ouest

[o.pacaud@brezillon.fr](mailto:o.pacaud@brezillon.fr)

## **eDNA: soil microbiome and One Health Approach**

Federica Cattapan, Directeur R&D Biologie - Mérieux NutriSciences (Italie)

The One Health approach underscores the interconnectedness of human, animal, and environmental health, highlighting the need for integrated strategies to tackle global health challenges. Environmental DNA (eDNA) has emerged as a transformative tool for exploring microbial communities in diverse ecosystems, with particular emphasis on soil microbiomes. These environmental microbiomes are central to ecosystem functionality, nutrient cycling, and pathogen suppression, while also serving as reservoirs for antimicrobial resistance (AMR) genes that can propagate across health domains.

Recent advances in analytical techniques, particularly metagenomics, have revolutionized our ability to analyze eDNA. These methods enable comprehensive, high-throughput profiling of microbial communities, including the detection of AMR determinants and the identification of novel microbial functions. By integrating metagenomic insights with ecological and health frameworks, researchers can uncover critical links between environmental microbiomes and One Health dynamics.

The potential of eDNA and metagenomics to address pressing issues at the intersection of environmental microbiomes, AMR, and ecosystem health will be explored.

## **Évaluation de l'efficacité de différentes mesures constructives sur les risques sanitaires résiduels en cas d'aménagement sur site à passif environnemental**

Auteurs : J. CHASTANET<sup>1</sup>, S. TRAVERSE<sup>1</sup>, (1) GINGER-BURGEAP, 19 rue de la Villette, 69425 Lyon Cedex 3

### **Résumé**

La pollution volatile présente dans les terrains du fait d'un passif environnemental peut être une des sources potentielles de la dégradation de la qualité de l'air intérieur. En présence de ce type de pollution, les bâtiments sont généralement construits avec des mesures constructives permettant de limiter les transferts vers les environnements intérieurs. Parmi ces mesures, le système de dépressurisation actif des sols sous dallage est une solution de plus en plus déployée pour les constructions neuves de plus de 200 m<sup>2</sup> sans qu'une étude de conception soit toujours préalablement réalisée. Dans ce contexte, sera présenté un nouvel outil permettant le dimensionnement de SDS en phase conception. L'efficacité d'un tel dispositif sera ensuite confrontée à d'autres mesures constructives (étanchéification, ...) sur un cas d'étude traitant du sujet au sein d'un Analyse des Risques Sanitaires Résiduels (selon norme NFX 31-620).

**Mots-clés : risques sanitaires, qualité de l'air intérieur, polluant volatil, pollution des sols, gaz du sol, mesures constructives, système de dépressurisation des sols (SDS), outil de dimensionnement**



## Jeudi 27 mars 2025

### Gestion des pollutions : traiter ou vivre avec ?

Modérateurs :

- *Philippe Oudin, Gérant fondateur - Semaco Environnement*
- *Jonathan Senechaud, Responsable développement d'activité Sites et Sols Pollués - Colas Environnement*

09h00

Un système de traitement thermique en conteneur pour la destruction des PFAS dans les sols contaminés

*Jan Haemers, Président-directeur général - Haemers Technologies (Belgique)*

09h20

Retour d'expérience sur une technique de dépollution permettant de séparer les PFAS des terres

*Didier Prodorutti, Ingénieur Dépollution et Environnement - Brézillon*

09h40

PFAS - Axes de traitement développés dans le groupe Ortec – Recherches portées par Ortec Soléo et Biogénie

*Clotilde Johansson, Chargée d'Affaires secteur R&D - Ortec Soleo*

10h00 Pause-café

10h30

Dépollution in situ d'un panache de PFAS par injection d'une barrière de charbon actif colloïdal dans un aéroport en Suède

*Mariangela Donati, Responsable de région - Regenesis (Italie)*

10h50

Traitement des PFAS par réduction biologique et chimique : des raisons d'y croire ?

*Boris Devic-Bassaget, Directeur Technique - SARPI Remédiation France*

11h10

Phytostabilisation d'un site minier. Etude de faisabilité : application au site du Bois Vert

*Souhir Soussou, Directrice - Fertil'Innov Environnement*

11h30

Le phytomanagement pour la gestion de la pollution et la valorisation écologique de la plaine de Chanteloup

*Alexandre Perlein, Ingénieur de Projet - Microhumus*

11h50

Traitement in-situ d'une pollution au Mercure par désorption thermique

*Matthieu Sangely, Business Expert advanced remediation services - Valgo*

12h10

Reconversion des friches : comment concilier réhabilitation, enjeux de préservation de la biodiversité et renaturation ? l'exemple de la ZAC Bongraine, Aytre (17)

*Gaëtan Urvoy, Directeur métier Sites et Sols Pollués - EODD*

12h30 Questions - Réponses - Discussions

13h00 Déjeuner

14h00

Optimisation du design de remédiation grâce à des données précises et des injections ciblées

- *Lionel Counet, Ingénieur Projet - Injectis (Belgique)*
- *Pieter Buffel, Responsable d'unité d'affaires - EnISSA (Belgique)*

14h20

Mise en œuvre d'une solution d'électroremédiation Fenton optimisée. Application avec la technologie EBRÒ (Electro-Bio-Remediation)

*Philippe Oudin, Gérant fondateur - Semaco Environnement*

14h40

Captages d'eau potable et pollution : comment contenir et traiter les impacts ?

*Gabriel Philibert, Chef de projet - Colas Environnement*

15h00 Pause-café

15h30

Réhabilitation d'anciens bassins de résidus miniers. Essais sur site de couvertures végétalisées : Mise en œuvre d'une gestion durable des sols pollués

*Camila Diaz Vanegas, Ingénieur Projet - Ramboll France*

15h50

Retours d'expérience sur l'application du guide ESSais de TRAitement de POLLution de sols (ESTRAPOL)

- *Emmanuel Vernus, Directeur Technique - Insavalor Provademse*
- *Annelise Gauthier, Directrice de Projets - Ginger T-LAB*

16h10

Réalisation d'essais pilote dans le cadre d'un projet de transformation d'un ancien site industriel en futur espace résidentiel

*Didier Prodorutti, Ingénieur Dépollution et Environnement - Brézillon*

16h30 Questions - Réponses - Discussions

17h00 Fin de la troisième journée / Fin du congrès



## Thursday March 27, 2025

### **Pollution management: treat or live with it?**

*Moderators:*

- *Philippe Oudin, Founder and Managing Director - Semaco Environnement*
- *Jonathan Senechaud, Polluted Sites and Soils Business Development Manager - Colas Environnement*

**09h00**

A containerized thermal treatment system for the destruction of PFAS in contaminated soils  
*Jan Haemers, CEO - Haemers Technologies (Belgium)*

**09h20**

Feedback on a remediation technique to separate PFAS from land  
*Didier Prodorutti, Depollution and Environment Engineer - Brézillon*

**09h40**

PFAS - Treatment developed by the group Ortec – Research carried on by Ortec Soléo and Biogénie  
*Clotilde Johansson, Business Manager R&D sector - Ortec Soleo*

**10h00** Coffee Break

**10h30**

In situ remediation of a PFAS plume using an injectable colloidal activated carbon barrier at an airport in Sweden  
*Mariangela Donati, District Manager - Regenesis (Italy)*

**10h50**

Treatment of PFAS by biological and chemical reduction: reasons to believe?  
*Boris Devic-Bassaget, Technical Director - SARPI Remediation France*

**11h10**

Phytostabilization of a mining site. Feasibility study: application to the Bois Vert site  
*Souhir Soussou, Director - Fertil'Innov Environnement*

11h30

Phytomanagement for the pollution management and the ecological valorization of the “boucle de Chanteloup”

*Alexandre Perlein, Project Engineer - Microhumus*

11h50

Mercury in-situ treatment by thermal desorption

*Matthieu Sangely, Expert Métier advanced remediation services – Valgo*

12h10

Conversion of brownfields: how to reconcile rehabilitation, issues of preserving biodiversity and renaturation? the example of the ZAC Bongraine, Aytre (17)

*Gaëtan Urvoy, Director of Polluted Sites and Soils – EODD*

12h30 Questions - Answers – Discussions

13h00 Lunch

14h00

Optimising remediation efforts with accurate data and targeted spin injection

- *Lionel Counet, Project Engineer - Injectis (Belgium)*
- *Pieter Buffel, Business Unit Manager - EnISSA (Belgium)*

14h20

Implementation of an optimized Fenton electroremediation solution. Application with EBRÒ (Electro-Bio-Remediation) technology

*Philippe Oudin, Founding Manager - Semaco Environnement*

14h40

Drinking water abstraction and pollution: how to contain and treat the impacts?

*Gabriel Philibert, Project Manager - Colas Environnement*

15h00 Coffee Break

15h30

Rehabilitation of old mining tailings ponds. On-site trials of vegetated covers: Implementation of sustainable management of polluted soils

*Camila Diaz Vanegas, Project Engineer - Ramboll France*

15h50

Lessons learned on the application of the ESTRAPOL Guidelines

- *Emmanuel Vernus, Technical Director - Insavalor Provademse*
- *Annelise Gauthier, Project Director - Ginger T-LAB*

16h10

Carrying out pilot tests as part of a project to transform a former industrial site into a future residential space

*Didier Prodorutti, Depollution and Environment Engineer – Brézillon*

16h30 Questions - Answers – Discussions

17h00 End of the Day Three / End of the congress

# A Containerized Thermal Treatment System for the Destruction of PFAS in Contaminated Soils

Jean Rhoné (jean.rhone@haemers-tech.com), Account Manager  
(Haemers Technologies, Brussels, Belgium)

## 1 Purpose of Study

Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) represent a significant environmental and health challenge due to their chemical and thermal stability, making them resistant to conventional remediation methods. This study focuses on developing and validating a containerized thermal treatment system (Patent pending) capable of not only extracting PFAS from contaminated soils but also destroying them entirely. The objective is to provide a sustainable, scalable, and efficient solution that eliminates the need for secondary waste treatment and reduces environmental risks. The project is done by Arkil AS and Haemers Technologies SA, with support of Eurofins, University of Copenhagen, and is financed by Danish Regions, under coordination by the Capital Region of Copenhagen.

## 2 Methodology

The containerized system employs **Thermal Conductive Heating (TCH)** to heat contaminated soil to temperatures between 350°C and 450°C, volatilizing PFAS into the vapor phase. These vapors are directed to individual high-temperature combustion chambers capable of exceeding 1,400°C, ensuring near-complete destruction of PFAS molecules through optimized residence time and turbulence. The energy released by those combustion chambers is used to heat the container itself through conductive heating. Circulating combustion gases transfer heat uniformly to the soil while minimizing energy losses. Integrated catalytic oxidation at the exhaust ensures emission compliance. This demonstration project at the Korsør site in Denmark follows a methodology to validate all said claims, through both targeted and non targeted PFAS analyses, at all stages of the process. This is the closest possible way to insure actual PFAS destruction by breaking all C-F bonds.

## 3 Summary of Findings/Results

Experimental validation will be presented, regarding the system's capability to achieve greater than 99% destruction of PFAS, with rigorous gas-phase and post-treatment soil analysis. The demonstration will start in January 2025 and is scheduled to be completed by May 2025.

## 4 Conclusion/Take-Home Message

This containerized thermal treatment system offers the potential for a complete solution for PFAS remediation in soils, combining advanced thermal desorption with in-situ destruction (thermal oxidation at very high temperatures) of PFAS molecules. The system eliminates secondary waste streams, reduces operational costs, and minimizes environmental impact. This system provides a practical and sustainable alternative to conventional methods, offering effective and comprehensive PFAS remediation for soils.

## 5 Significance/Contributions of Study

By integrating extraction and destruction within a compact and portable design, this innovation addresses the limitations of traditional approaches. Its ability to adapt to various site conditions and contaminants, coupled with its energy efficiency, makes it a transformative solution for managing PFAS contamination in soil globally. This innovation contributes to cleaner environments and reduces the long-term risks associated with PFAS pollution.

**Retour d'expérience sur une technique de dépollution  
permettant de séparer les PFAS des terres**  
**Feedback on a remediation technique to separate PFAS from land**

**Résumé**

Traiter les sols contaminés aux PFAS est l'enjeu crucial à venir en matière de protection de l'environnement et de la santé humaine. Ils peuvent agir comme une source continue de pollution, libérant des PFAS dans l'air, l'eau, les plantes et sont de plus en plus souvent mis en évidence dans les phases de diagnostics. Le traitement de ces sols peut être nécessaire pour limiter leur dispersion dans l'environnement.

Les équipes Brézillon développent des solutions pour accompagner les donneurs d'ordre privés et publics dans le traitement de ces polluants et ont réalisé des essais afin de séparer les PFAS des sols par hydro-cyclonage.

L'objet de l'intervention portera sur le retour d'expérience de ce type de traitement et son efficacité sur les PFAS.

Intervenant :

Didier Prodorutti - Direction ingénierie

[d.prodorutti@brezillon.fr](mailto:d.prodorutti@brezillon.fr)

**PFAS – AXES DE TRAITEMENT DEVELOPPES DANS LE GROUPE ORTEC  
RECHERCHES PORTEES PAR ORTEC SOLEO ET BIOGENIE**

**PFAS – TREATMENT DEVELOPED BY THE GROUP ORTEC  
RESEARCH CARRIED ON BY ORTEC SOLEO AND BIOGENIE**

**Clotilde Johansson<sup>1</sup>, Christophe Chene<sup>1</sup>,  
Neil Hopkins<sup>2</sup>, Dany Landry<sup>3</sup>, David Muir<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> ORTEC-SOLEO, 8 ter avenue du Docteur Schweitzer, Meyzieu, 69330, France

<sup>2</sup> BIOGENIE Remediation LTD, Green Meadow Springs Business Park, Columbus House, Village Way, Cardiff CF15 7NE, Royaume-Uni

<sup>3</sup> BIOGENIE, 505, boul. du Parc-Technologique, bureau 230, Québec G1P 4S9, CANADA

**Présenté par :** Clotilde Johansson – ORTEC SOLEO – clotilde.johansson@ortec.fr

**Caractère innovant :** Développement et optimisation des traitements des sols et eaux impactés par les PFAS. *La thermolyse catalysée est une innovation ayant fait l'objet d'un dépôt de brevet, les autres techniques sont connues dans la littérature, approfondies dans nos recherches.*

**Mots clés :** PFAS, Lavage de sol, désorption thermique, dégradation thermique catalysée, moussage, biosurfactants, stabilisation.

**Objectifs :** Plusieurs axes de recherche pour être en mesure de proposer une solution complète de gestion des sols et eaux pollués par des PFAS, des solutions adaptées au terrain.

**Abstract :**

De nombreuses publications scientifiques alertent sur la présence ubiquiste de substances poly- et perfluoroalkylées (PFAS) dans les eaux, les sols et la biosphère, s'intéressant à la dispersion et accumulation de ces polluants persistants dans l'environnement, à leur toxicologie, et bien entendu aux solutions de mesures et traitements possibles.

Les PFAS sont des surfactants synthétiques présents sous plusieurs milliers de formes dont la structure chimique comporte une chaîne carbonée hydrophobe chargée de fluorures et une tête hydrophile composée d'un acide. Leur stabilité et multiples propriétés ont induit un emploi dans de nombreux domaines, générant une importante pollution diffuse, et la présence localisée de terres et eaux fortement impactées.

La France a lancé auprès des industriels une campagne de mesures pour identifier et quantifier les teneurs en PFAS dans les eaux de rejets sur le territoire. Une réglementation sur les rejets et seuils tolérables est pressentie dans les années à venir.

De nombreuses techniques de traitement sont développées aujourd'hui dans la littérature et la profession. Les techniques de dégradations (incinération > 1000°C, fluide supercritique, plasma, combustion, ball milling, électroremédiation...) sont énergivores et nécessitent des installations spécifiques. Les techniques d'extractions/concentrations (filtration sur charbons, résines, osmose inverse, nanofiltration, lavage de sols ou moussage des eaux...), dont les rendements varient selon les effluents, nécessitent également des installations spécifiques ou de fortes quantités de médias, les déchets finaux restant un challenge. Les filières ne sont pas encore optimisées et peu adaptées à un déploiement de traitement à grande échelle.

Voilà pourquoi la recherche interne du groupe ORTEC, menée par ORTEC SOLEO (France) et BIOGENIE (France, UK, Canada) a pour objectif d'apporter une réponse globale de gestion des sols et eaux impactés par des PFAS. La volonté est de développer des solutions économiquement optimisées, adaptées au terrain, allant de l'extraction jusqu'à la destruction finale des PFAS in-situ ou sur/hors site.

Les axes de recherche de **BIOGENIE – UK** se tournent principalement sur les procédés de **stabilisation des PFAS** par ajout de différents additifs comme des liants hydrauliques (ciments) et/ou des adsorbants (cendres volantes, charbon actif, adsorbants spécifiques...). Des essais laboratoires ont été lancés pour stabiliser un sol impacté par des PFAS, avec mesure des lixiviations et de la tenue dans le temps (64 jours) de cette stabilisation. Ces essais permettent d'anticiper l'efficacité plus long terme de ce type de traitement. Les résultats seront disponibles pour la conférence.

Chez **BIOGENIE – Canada**, la recherche s'est orientée sur le traitement de lixivats de décharge. Leur plateforme traite cet effluent par dégradation biologique des composés organiques et azotés, et la présence de PFAS a été observée dans les eaux. Pour anticiper l'évolution de la réglementation, des essais ont été lancés pour tenter **d'extraire les PFAS par moussage**. Les essais internes montrent une concentration des PFAS dans la mousse, elle est d'environ un facteur 3 lors du moussage de l'effluent brut par ajout du tensioactif *Mousse-net-plus*. Des essais réalisés par ORTEC SOLEO avec emploi du tensio-actif Tween 80 sur une eau de nappe contaminée par des PFAS montrent également une concentration dans la mousse, cette fois de l'ordre d'un facteur 10. En revanche, l'extraction s'avère bien plus efficace lorsque sont utilisés les biosurfactants générés par le procédé biologique : une concentration dans la mousse d'un facteur 100 est observé (avec un simple arrêt d'ajout d'antimousse dans le bioréacteur sur une courte durée). Le procédé peut donc être optimisé en sélectionnant le surfactant, tout en prenant soin de ne pas endommager la communauté bactérienne du bioréacteur. Un projet de recherche approfondi a été lancé en novembre par l'équipe de BIOGENIE – Canada sur ce sujet.

En France, la recherche centralisée par **ORTEC SOLEO** s'est intéressée, entre autres, à deux procédés de traitement des sols : le lavage et le traitement thermique.

Les résultats des **essais de lavage de terres** impactées par les PFAS attestent une présence de ces polluants principalement sur les particules fines des sols (état initial < 4mm : 2 300 µg/kg). Après lavage (ratio eau/sol 2,25/1), des abattements de 68 à 84% sont obtenus sur les éléments grossiers (> 4mm), et de 78% dans les sables [63µm – 4mm], les fines (<63µm) restant aussi concentrées qu'à l'initial. La séparation granulométrique n'étant pas optimale, les concentrations résiduelles sur les grossiers et sables sont majoritairement imputables aux fines restantes dans ces matrices. Le comportement des PFAS au lavage est donc très similaire à celui de composés organiques (HCT, COT...), avec néanmoins une proportion importante de PFAS dissous dans les eaux de lavage (21%). Le choix du flocculant et des paramètres physico-chimiques des eaux permet d'optimiser la rétention des PFAS sur les particules de sol, favorisé pour les formes sulfoniques, la variation d'efficacité allant de 11% (flocculant anionique, défavorisé par répulsions électrostatiques) à 41% pour le choix de flocculants cationiques. L'abaissement du pH des eaux (à pH 1,9) permet également une précipitation des PFAS sur les particules, avec un taux de rétention de 59%. Le procédé de lavage des sols est donc efficace pour concentrer la pollution dans la fraction fine des sols.

Les résultats des **essais thermiques** ont montré qu'une désorption des PFAS à "faible température" (300°C) est possible si un temps suffisamment long est donné. Les essais en four montrent une perte des 20 PFAS (échantillon riche en PFOS – 1850 µg/kg) de 66% après 2j et 93% après 20j de chauffe. Ces essais servent de témoin à une version **de thermolyse catalysée**, dans laquelle le même essai a été réalisé avec ajout dans le sol d'un catalyseur. Les résultats obtenus montrent une disparition des 20 PFAS de 97% en deux jours et de 99,98% à 20j, accompagnée d'une augmentation en fluorures lixiviables du sol. Cette technique a fait l'objet d'un dépôt de brevet. Des essais internes

sont en cours pour optimiser le traitement (de plus amples résultats seront disponibles pour la conférence).

ORTEC SOLEO a également la volonté de lancer un **projet de recherche** de plus grande ampleur pour mieux comprendre les mécanismes en jeu dans la thermolyse catalysée et identifier les sous-produits de dégradation formés, mais également pour optimiser le procédé de lavage et travailler de concert avec la plateforme VALORTEC pour développer, pour le traitement des déchets ultimes, un dispositif de concentration – élimination des PFAS en solutions aqueuses

---

**PFAS – AXES DE TRAITEMENT DEVELOPPES DANS LE GROUPE ORTEC  
RECHERCHES PORTEES PAR ORTEC SOLEO ET BIOGENIE**

**PFAS – TREATMENT DEVELOPED BY THE GROUP ORTEC  
RESEARCH CARRIED ON BY ORTEC SOLEO AND BIOGENIE**

**Clotilde Johansson<sup>1</sup>, Christophe Chene<sup>1</sup>,  
Niel Hopkins<sup>2</sup>, Dany Landry<sup>3</sup>, David Muir<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> ORTEC-SOLEO, 8 ter avenue du Docteur Schweitzer, Meyzieu, 69330, France

<sup>2</sup> BIOGENIE Remediation LTD, Green Meadow Springs Business Park, Columbus House, Village Way, Cardiff CF15 7NE, Royaume-Uni

<sup>3</sup> BIOGENIE, 505, boul. du Parc-Technologique, bureau 230, Québec G1P 4S9, CANADA

**Speaker:** Clotilde Johansson – [clotilde.johansson@ortec.fr](mailto:clotilde.johansson@ortec.fr)

**Innovative character:** PFAS: development and optimization of soil and water treatments. Catalyzed thermolysis is an innovation that has been patented, the other techniques are known in literature and have been deepened by our research programs.

**Keywords:** PFAS, soil washing, thermal desorption, catalyzed thermal degradation, foaming, biosurfactants, stabilization.

**Objectives:** Follow several research axes to be able to propose a complete solution for the management of soil and water polluted by PFAS, from extraction to destruction, solutions adapted to the field.

**Abstract:**

Numerous scientific papers warn of the ubiquitous presence of poly- and per-fluoroalkylated substances (PFAS) in water, soil and biosphere, focusing on the dispersion and accumulation of these persistent pollutants in the environment, their toxicology, the way to measure them and possible treatment solutions.

PFAS are synthetic surfactants, present in thousands of forms, with a chemical structure that includes a hydrophobic carbon chain loaded with fluorine and a hydrophilic head composed of an acid. Their stability and multiple properties have led to employment in many areas, generating significant diffuse pollution, and the localized presence of strongly impacted soil and water.

French government has asked industrials to realize a measurement campaign to identify and quantify PFAS levels in water discharged on the territory. Regulations on releases and tolerable thresholds are expected in coming years.

Many techniques are developed today, as showed by numerous publications. Degradation techniques (incineration > 1000°C, supercritical fluid, plasma, combustion, ball milling, electroremediation...) are energy-intensive and require specific installations. Extraction/concentration techniques (filtration on activated carbon, resins, reverse osmosis, nanofiltration, soil washing or foaming of water...), whose yields vary accordingly to the effluent, also require specific installations or large quantities of media. Final waste remains a challenge. The options are not yet optimized and poorly adapted to a large-scale deployment.

Therefore, internal research of the ORTEC group, conducted by ORTEC SOLEO (France) and BIOGENIE (France, UK, Canada) aims to provide a global response to the management of soil and water impacted by PFAS. The intention is to develop cost-effective, field-adapted solutions from extraction to final destruction of PFAS in situ or on/off site.

The research areas of **BIOGENIE – UK** focuses on PFAS stabilization processes to limit environmental impact by adding various additives such as hydraulic binders (principally cement) and a range of adsorbents (fly ash, activated carbon, proprietary reagents...). Laboratory tests have been launched to stabilize soils impacted by PFAS, with measurements of PFAS in leachates at different time periods (up to 64 days). The test protocol also allows for assessment of potential PFAS release in the longer term.

**BIOGENIE – Canada** focused on the treatment of landfill leachate. Their platform treats this effluent by biological degradation of organic and nitrogen compounds, and PFAS has been observed in the waters. To anticipate regulatory developments, trials have been launched to extract PFAS by foaming. Internal tests show a concentration of PFAS in the foam, which is approximately 3 times higher than raw effluent when foamed with the addition of surfactant *Mousse-net-plus*. Tests performed by ORTEC SOLEO using the surfactant Tween 80 on a PFAS contaminated groundwater also show a concentration in the foam of about 10 times. However, extraction is much more efficient when using biosurfactants generated by the biological process, the concentration in the foam was enhanced to a factor 100 (with a simple stop of antifoam addition in the bioreactor over a short period). The process can therefore be optimized by selecting the surfactant, while taking care not to damage the bacterial community of the bioreactor. A research project was launched by the BIOGENIE – Canada on this topic in November.

The research carried out by **ORTEC SOLEO - France** focused on two soil treatment processes: washing and heating treatments. Results from PFAS-impacted **soil washings** indicate that these pollutants are present primarily in fine soil particles (initial condition < 4mm: 2 300 µg/kg). After washing (water/soil ratio 2.25/1), abatement of 68 to 84% are obtained on coarse elements (> 4mm), and 78% in sands [63µm - 4mm]. The fines (<63µm) remaining as concentrated as the initial. The particle separation is not optimal, so the residual concentrations on coarses and sands are mainly attributable to the remaining fines in these matrices. The behavior of PFAS is therefore very similar to that of organic compounds (HCT, TOC...), but with a significant proportion dissolved in the water phase (21%). The choice of flocculant and physico-chemical parameters allows to optimize the retention of PFAS on soil particles, favored for sulfonic forms. The abatement ranging from 11% (anionic flocculant, disadvantaged by electrostatic repulsions) to 41% for cationic flocculants. Lowering the pH of water (at pH 1.9) also allows precipitation of PFAS on particles, with a retention rate of 59%. The soil washing process is therefore effective in concentrating pollution in the fine fraction of soils.

**Thermal-extraction/degradation** experiments showed that a desorption of PFAS at 'low temperature'(300°C) is possible if sufficient time is given. The oven tests show a loss of 20 PFAS (PFOS rich sample - 1850 µg/kg) of 66% after 2 days and 93% after 20 days heating. These tests serve as a control for a version of catalyzed thermolysis, in which the same test was carried out with the addition

of a catalyst to the soil. The results obtained show a disappearance of the 20 PFAS of 97% in two days and 99.98% after 20 days, accompanied by an increase in soil leachable fluorides. This technique has been patented. Internal trials are underway to optimize processing. (more results will be available for the conference).

ORTEC SOLEO is also willing to launch a larger research project to better understand the mechanisms involved in catalyzed thermolysis and identify the degradation by-products formed. This project will also focus on optimization of the washing process and finally, work with VALORTEC to develop a concentration and degradation device for the final elimination of PFAS in aqueous solutions.

## Dépollution *in situ* d'un panache de PFAS par injection d'une barrière de charbon actif colloïdal dans un aéroport en Suède

Mariangela Donati, REGENESIS, Italie (mdonati@regenesi.com)

**Mots clés :** PFAS, traitement *in situ*, techniques innovantes, étude de cas, durabilité

**Contexte :** Sur le site d'un aéroport, dans le centre-est de la Suède, un projet de dépollution a été mené, ciblant une contamination de la nappe par des substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS). La source de la contamination était un ancien terrain d'entraînement à la lutte incendie où des mousses filmogènes aqueuses (AFFF) contenant des PFAS avaient été déversées lors des exercices de lutte contre les incendies. Les PFAS migraient dans l'aquifère sablonneux peu profond, pour finalement refaire surface dans une source située à environ 100 m en aval. Les échantillons d'eau souterraine révélaient des concentrations de PFAS allant de 100 000 à 200 000 ng/L, le perfluorooctane sulfonate (PFOS) représentant environ 75 % du mélange de PFAS détecté. Le gouvernement suédois avait établi que le site était idéal pour tester l'installation d'une barrière de charbon actif colloïdal (CAC) pour l'adsorption des PFAS dans le cadre d'un projet pilote. La barrière serait installée sur une portion du panache, en aval du terrain d'entraînement à la lutte incendie, et les données de suivi sur les performances du traitement seraient collectées.

**Approche :** La barrière de CAC a été mise en place sur une section de panache de 70 m, en ciblant la zone centrale du panache qui présentait le flux massique de PFAS le plus élevé. Le dimensionnement de la barrière comprenait trois rangées de points d'injection espacés de 1,5 m, s'étendant verticalement de la nappe phréatique jusqu'à la couche d'argile sous-jacente. Pour améliorer l'adhérence du CAC à la matrice de l'aquifère, une solution de chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ) a été injectée le long d'une quatrième rangée, située en aval de la barrière. Avant injection, de nombreuses carottes de sol ont été prélevées pour vérifier la profondeur de la couche d'argile et déterminer avec précision les intervalles d'injection point par point. Des essais d'injection approfondis ont été réalisés pour évaluer les taux d'acceptation de fluides, la distribution latérale du CAC, son adhérence et sa mobilité après injection, ainsi que l'emplacement et le moment optimaux pour les injections de  $\text{CaCl}_2$ . L'installation de la barrière a été réalisée en 9 semaines, en utilisant jusqu'à 5 foreuses et en employant des tarières rotatives et la méthode « direct push ». Les échantillons d'eau souterraine (162 au total) ont été prélevés fréquemment afin de surveiller la distribution du CAC et de confirmer le chevauchement des points d'injection, garantissant ainsi la continuité de la barrière. Un logiciel de gestion et de reporting des données géotechniques, connecté au cloud, a été utilisé pour standardiser les données d'application et les communiquer en temps réel à l'équipe projet.

**Résultats / enseignements tirés :** Malgré des conditions difficiles – la dernière partie de l'application a été réalisée sous de fortes chutes de neige et par des températures descendant jusqu'à  $-20\text{ °C}$  – le projet a été achevé avec succès dans les délais prévus. Le suivi post-application, mené pendant 12 mois jusqu'à présent, a montré une réduction spectaculaire des concentrations de PFAS. Dès le premier mois, les concentrations **en somme des** PFAS dans la nappe au niveau de la barrière ont été réduites de plus de 95 %, et elles ont continué à diminuer au cours des six mois suivants, pour atteindre des concentrations proches ou inférieures aux seuils de détection. Deux mois après l'application, les concentrations de PFAS à 35 mètres en aval de la barrière ont commencé à décroître, affichant une réduction comparable au cours de la période de suivi. Les puits de surveillance situés à 65 mètres en aval ont également enregistré une baisse régulière des concentrations de PFAS, avec une réduction globale de plus de 75 %. Cela démontre

le passage d'eau propre à travers la barrière, associé à la présence d'une masse de pollution dans la porosité immobile entre la barrière et les points de surveillance qui donne une rétrodiffusion dans la porosité mobile. Les concentrations en aval diminuent à mesure que cette masse s'épuise avec le temps. Le traitement a prouvé son efficacité à réduire, pour l'environnement en aval, le risque lié à la pollution aux PFAS provenant du terrain d'entraînement à la lutte incendie, et le suivi se poursuivra sur le site.

## Traitement des PFAS par réduction biologique et chimique : des raisons d'y croire ?

SARPI Remédiation France, 17, Rue du Périgord - 69330 MEYZIEU, membre UPDS

Jean-Baptiste Para / Sofie Herssens / Direction technique Sarpi Remediation

Présentateur: **Boris Devic-Bassaget** (boris.devic-bassaget@veolia.com) - Directeur Technique, Lyon, France

### Thème 4 - Gestion des pollutions : traiter ou vivre avec ?

Acronymes :

- PFAS: Per Fluoro Alkyl Substance
- ISCR : In situ Chemical Reduction
- ISBR : In situ Chemical Reduction
- SR: Sulfatoréduction

Le traitement des PFAS in situ reste à ce jour peu étudié autrement que par séquestration par injection de charbon actif, l'extraction physique (pompage avec concentration ou non) ou la stabilisation in situ (soil-mixing par exemple). L'oxydation classique en SSP (réactif de Fenton / permanganate ou persulfate activé) ne donne pas de résultats concluants, voire empirent la situation en oxydant les précurseurs et en créant des sous-produits stables tels que ceux analysés aujourd'hui.

La voie réductrice n'était pas ou peu étudiée, ou alors combinée à une oxydation. SARPI Remediation a testé cette voie en laboratoire : réduction biologique / réduction chimique / sulfato réduction et leurs combinaisons.

Cette étude a porté sur une matrice composite de 3 sites en Europe afin d'élargir le panel de substances et de mettre le plus de chances de trouver une source bactérienne naturellement présente dans les sols, comme il est en général l'usage lors d'une stimulation biologique *in situ*. Comme il s'agit d'une étude de concept, les analyses n'ont été faites que sur le pack 20 PFAS.

Les impacts initiaux dans les sols sont les suivants ( ) :

- PFOS 91% / 2000- 2300 µg/kg MS
- PFHxS 3.6% / 79-100 µg/ kg MS
- PFOA 1.8% / 40-52 µg/kg MS
- Autres composés : 4% : PFHxA, PFBA, PFHpA, PFPeA, PFPeS, PFHpS, PFNS

Le tableau suivant résume les conditions d'essai:

N° Essai	Conditions d'essais et dosage	mode de traitement
E0	Témoin : sol de 3 sites Européens (surface et profond - ZNS)	Témoin (mis en anaérobie sans amendement)
E1	E0 + 1% source de carbone (mix mélasse + huile de soja)	Biodégradation anaérobie (ISBR)
E2	E0 + 2% Fer zéro valent Fe <sup>0</sup> 80µm activé	Réduction chimique stricte (ISCR)

## Traitement des PFAS par réduction biologique et chimique : des raisons d'y croire ?

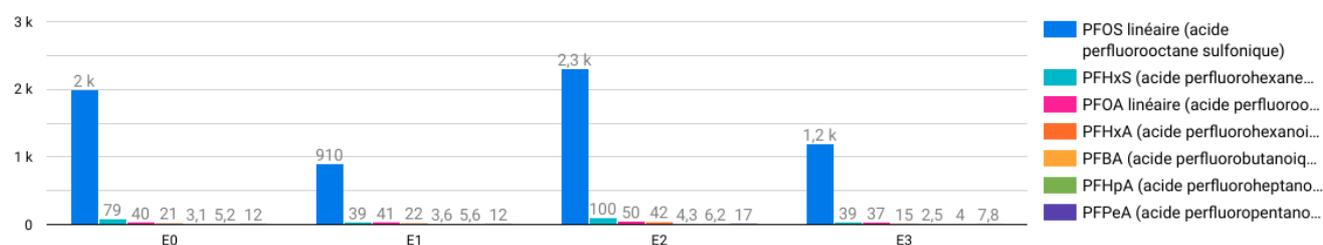
E3	E0 + 2% CaSO4 + 1% Source de carbone	Biodégradation anaérobie ISBR + sulfato réduction
E4	E0 + 1% Source Carbone + 2% Fe° 80 µm	ISBR + ISCR
E5	E0+ 2% CaSO4 + 2% Fe° 80 µm	ISCR + sulfato réduction
E6	E0+ 2% CaSO4 + 1% Source de Carbone + 2% Fe° 80 µm	ISCR + ISBR + Sulfatoreduction

Les essais sont menés en milieu clos, en absence de contact avec l'air, sur une durée de plus de 5 mois sur les 7 matrices dont le témoin. Le pas de temps analytique a varié entre 1 et 2 mois, en fonction des résultats des campagnes.

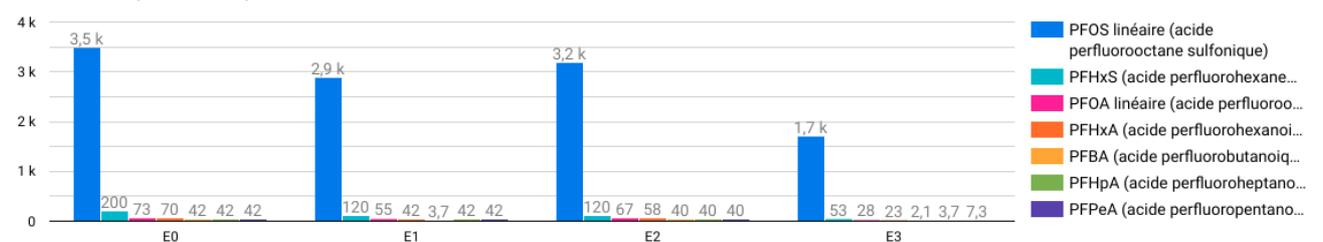
Les résultats sont présentés sous forme de graphiques.

Pour la série E1 à E3:

Etat initial:

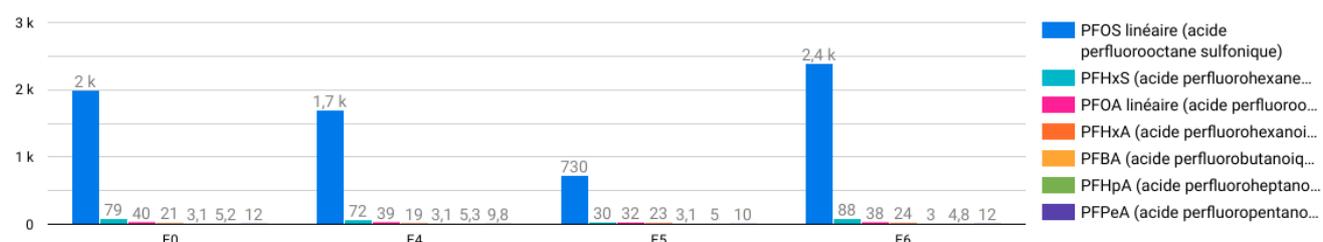


Etat final après 156 jours:



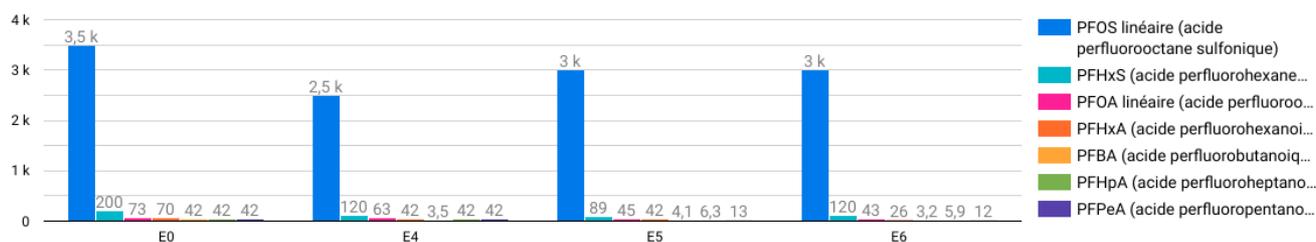
Pour la série E4 à E6:

Etat initial :



Etat final après 156 jours:

## Traitement des PFAS par réduction biologique et chimique : des raisons d'y croire ?



Il a été mis en évidence dans un premier temps

- une grande variabilité des résultats analytiques y compris sur le témoin, ce qui rendait les interprétations très délicates, et ce en ayant pris soin d'utiliser le même laboratoire tout le long de l'étude
- Globalement les résultats sont mitigés, on peut même observer une production de PFAS. la dégradation de précurseurs non analysés qui pourraient conduire à augmenter les PFAS sous produit (comme cela est souvent le cas en oxydation). Malheureusement, il n'a pas été réalisé de TopAssay sur le témoin pour permettre d'affirmer cette hypothèse.

Résultats :

- Il a été observé une tendance de stabilité des PFAS sulfoniques
- Les PFAS carboxyliques ont montré davantage de variations, mais leur concentration initiale était moindre
- Résultats mitigés. Le couplage des techniques n'améliore pas sensiblement la tendance.

### Essais microbiologiques:

En fin d'essais, après 1 an de conservation des éprouvettes fermées, des analyses de population bactérienne ont été réalisées par la Direction des Expertises Scientifique et Technique de VEOLIA.

Un témoin négatif d'extraction a été réalisé (solution stérile de tampon phosphate, PBS 1X)

Le dosage de l'ADN à été réalisé avec le Kit de dosage d'ADN db HS Qubit™.

La quantification bactérienne est réalisée par q-PCR ciblée sur une région de l' ARNr 16 S.

Les réactions de qPCR ARNr 16 S sont réalisées dans un mélange réactionnel contenant les composés suivants: 2X SsoFast™ EvaGreen® Supermix (Biorad, USA) / amorces V3F (CTACGGGAGGCAGCAG) et V3R (TTACCGCGGCTGCTGGCAG) et de l'ADN métagénomique. Chacun des triplicats d'extraction a été analysé en duplicat de qPCR.

Nom	Traitement	[ADN] ng/μL	Concentration bactérienne moyenne en bactéries / g de boue brute	Remarque
Limites		Témoin négatif = 0,005	LD = 10 <sup>4</sup> / * Présence non quantifiable	
E0	Témoin	0,358 (+/- 0,111)	1,48.10 <sup>7</sup>	
E1	Biodégradation anaérobie (ISBR)	2,169 (+/- 1,523)	2.10 <sup>8</sup>	x 10 en activité bio

## Traitement des PFAS par réduction biologique et chimique : des raisons d'y croire ?

E2	Réduction chimique stricte (ISCR)	0,007 (+/- 0,004)	$10^4 < \text{valeur} < 10^5$ *	Effet biocide du fer ?
E3	Biodégradation anaérobie ISBR + sulfato réduction	0,099 (+/- 0,078)	$8,29 \cdot 10^6$	Effet biocide des sulfates ?
E4	ISBR + ISCR	0,010 (+/- 0,005)	$2,22 \cdot 10^5$	Effet biocide du fer ?
E5	ISCR + sulfato réduction	0,031 (+/- 0,046)	$10^4 < \text{valeur} < 10^5$ *	Effet biocide du fer ?
E6	ISCR + ISBR + Sulfatoredution	0,008 (+/- 0,002)	$10^4 < \text{valeur} < 10^5$ *	Effet biocide du fer ?

### Conclusions:

- Le traitement par réduction selon 6 voies (biologique / chimique / Sulfato Réduction et leur combinaison) : peu concluant
- Possibilité de création de sous produits de dégradation issus de précurseurs : possible (pas de Top Assay en amont), mais peu probable niveau de PFAS resté Stables dans un fourchette de +/- 50%)
- Inhibition bactérienne par le fer zérovalent activé effective, mais même non activé.
- Bactéries activées par la source de carbone, mais faiblement. Pas d'attaque des PFAS
- Gros problème analytique malgré l'emploi du même laboratoire
- En tout état de cause, cette étude semble confirmer pourquoi les PFAS sont qualifiés de polluants éternels

## Traitement des PFAS par réduction biologique et chimique : des raisons d'y croire ?

SARPI Remediation France, 17, Rue du Périgord - 69330 MEYZIEU, UPDS member

**Jean-Baptiste Para / Sofie Herssens/** Technical Direction Sarpi Remediation

Presenter: Boris Devic-Bassaget (boris.devic-bassaget@veolia.com) - Technical Director, Lyon, France

### Theme 4 - Pollution management: treat or live with it?

Acronyms :

- PFAS: Per Fluoro Alkyl Substance
- ISCR : In situ Chemical Reduction
- ISBR : In situ Chemical Reduction
- SR: Sulfate reduction

The treatment of PFAS in situ remains little studied to date other than by sequestration by injection of activated carbon, physical extraction (pumping with or without concentration) or in situ stabilization (soil-mixing for example). Classical oxidation in SSP (Fenton reagent / activated permanganate or persulfate) does not give conclusive results, or even worsens the situation by oxidizing the precursors and creating stable by-products such as those analyzed today.

The reductive pathway was not or little studied, or combined with oxidation. SARPI Remediation tested this pathway in the laboratory: biological reduction / chemical reduction / sulfate reduction and their combinations.

This study focused on a composite matrix of 3 sites in Europe in order to broaden the panel of substances and to increase the chances of finding a bacterial source naturally present in soils, as is generally the case during in situ biological stimulation. As this is a concept study, the analyses were only carried out on the 20 PFAS pack.

The initial impacts in soils are as follows ():

- PFOS 91% / 2000- 2300 µg/kg DM
- PFHxS 3.6% / 79-100 µg/ kg MS
- PFOA 1.8% / 40-52 µg/kg MS
- Other compounds: 4%: PFHxA, PFBA, PFHpA, PFPeA, PFPeS, PFHpS, PFNS

The following table summarizes the test conditions:

No. Test	Test conditions and dosage	processing mode
E0	Control: soil from 3 European sites (surface and deep - vadose)	Control (put in anaerobic condition without amendment)
E1	E0 + 1% carbon source (molasses + soybean oil mix)	Anaerobic biodegradation (ISBR)
E2	E0 + 2% Zero valent iron Fe <sup>0</sup> 80µm activated with HCl	"Strict" Chemical Reduction (ISCR)
E3	E0 + 2% CaSO <sub>4</sub> + 1% Carbon source	Anaerobic biodegradation ISBR + sulphate reduction SR

Traitement des PFAS par réduction biologique et chimique : des raisons d'y croire ?

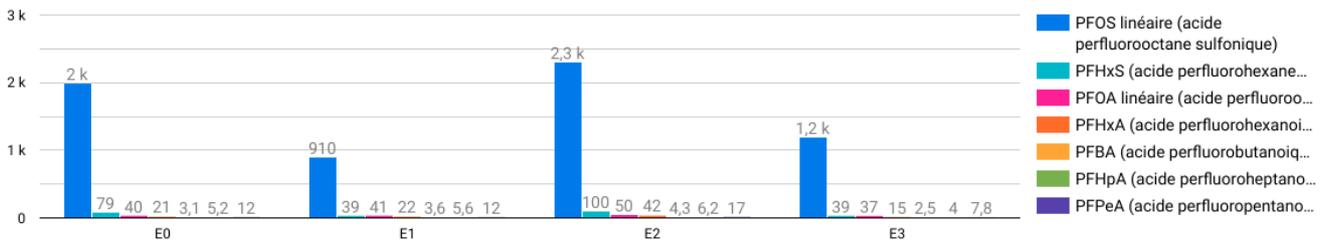
E4	E0 + 1% Carbon Source + 2% Fe° 80 µm	ISBR + ISCR
E5	E0+ 2% CaSO4 + 2% Fe° 80 µm	ISCR + sulfate reduction SR
E6	E0+ 2% CaSO4 + 1% Carbon Source + 2% Fe° 80 µm	ISCR + ISBR + Sulfate reduction SR

The tests were conducted in a closed environment, in the absence of contact with air, over a period of more than 5 months on the 7 matrices including the control. The analytical time step varied between 1 and 2 months, depending on the results of the campaigns.

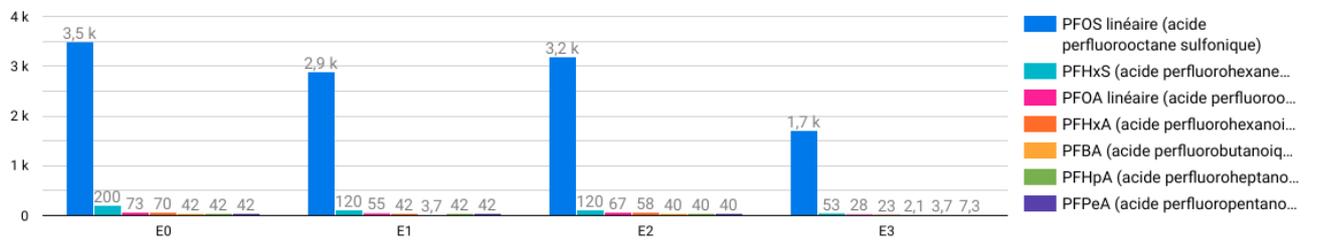
The results are presented in the form of graphs.

For E1 to E3 series:

Initial state:

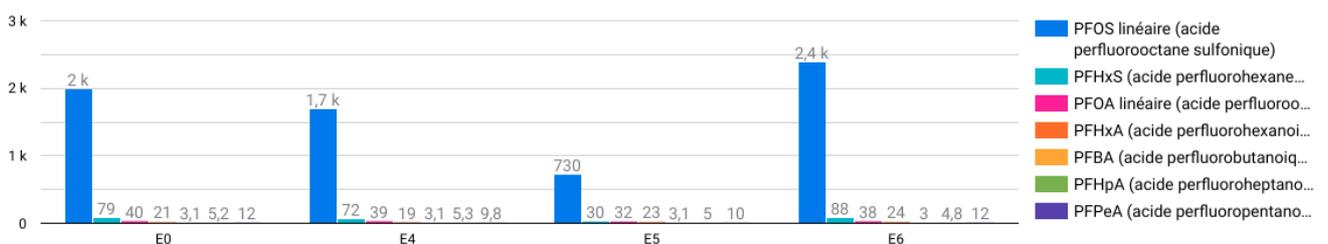


Final state after 156 days:



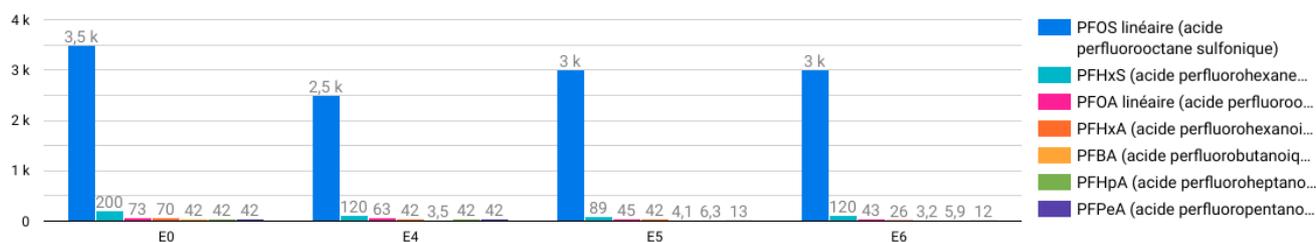
For E4 to E6 series:

Initial state:



Final state after 156 days:

## Traitement des PFAS par réduction biologique et chimique : des raisons d'y croire ?



It was first highlighted:

- a large variability of the analytical results including on the control, which made the interpretations very delicate, and this having taken care to use the same laboratory throughout the study
- Overall the results are mixed, we can even observe a production of PFAS. the degradation of unanalysed precursors which could lead to an increase in the PFAS by-product (as is often the case in oxidation). Unfortunately, a TopAssay was not carried out on the control to allow this hypothesis to be affirmed.

Results :

- A trend in stability of sulfonic PFAS was observed
- Carboxylic PFAS showed more variation, but their initial concentration was lower
- Mixed results. Coupling techniques does not significantly improve the trend.

### Microbiological tests:

At the end of the tests, after 1 year of storage of the closed test tubes, bacterial population analyses were carried out by the VEOLIA Scientific and Technical Expertise Department.

A negative extraction control was performed (sterile phosphate buffer solution, PBS 1X)

DNA assay was performed using the Qubit™ HS dsDNA Assay Kit.

Bacterial quantification is performed by q-PCR targeted on a region of 16S rRNA.

16S rRNA qPCR reactions were performed in a reaction mixture containing the following compounds: 2X SsoFast™ EvaGreen® Supermix (Biorad, USA) / primers V3F (CTACGGGAGGCAGCAG) and V3R (TTACCGCGGCTGCTGGCAG) and metagenomic DNA. Each of the extraction triplicates was analyzed in qPCR duplicate.

Name	Treatment	[DNA] ng/μL	Average bacterial concentration in bacteria / g of raw sludge	Noticed
Boundaries		Negative control = 0.005	LD = 10 <sup>4</sup> / * Non-quantifiable presence	
E0	Witness	0.358 (+/- 0.111)	1,48.10 <sup>7</sup>	
E1	Anaerobic	2,169 (+/- 1,523)	2.10 <sup>8</sup>	x 10 in organic activity

## Traitement des PFAS par réduction biologique et chimique : des raisons d'y croire ?

	biodegradation (ISBR)			
E2	Stringent Chemical Reduction (ISCR)	0.007 (+/- 0.004)	$10^4 < \text{value} < 10^5$ *	Biocidal effect of iron?
E3	Anaerobic biodegradation ISBR + sulphate reduction	0.099 (+/- 0.078)	$8.29 \cdot 10^6$	Biocidal effect of sulfates?
E4	ISBR + ISCR	0.010 (+/- 0.005)	$2.22 \cdot 10^5$	Biocidal effect of iron?
E5	ISCR + sulphate reduction	0.031 (+/- 0.046)	$10^4 < \text{value} < 10^5$ *	Biocidal effect of iron?
E6	ISCR + ISBR + Sulfate reduction	0.008 (+/- 0.002)	$10^4 < \text{value} < 10^5$ *	Biocidal effect of iron?

### Conclusions:

- Treatment by reduction according to 6 routes during 156 days (biological / chemical / Sulfatoreduction and their combination): inconclusive
- Possibility of creation of degradation by-products from precursors: possible (no TopAssay analysis on control sample), but unlikely (PFAS level remained stable within a range of +/- 50%)
- Bacterial inhibition by activated zerovalent iron effective, but even not activated.
- Bacteria activated by carbon source, but weakly. No PFAS attack
- Major analytical problem despite using the same laboratory
- In any case, this study seems to confirm why PFAS are called eternal pollutants.

# PHYTOSTABILISATION D'UN SITE MINIER

Etude de faisabilité : application au site du Bois Vert

**Souhir SOUSSOU** <sup>1\*</sup>, **Alexandre GEOFFROY** <sup>1</sup>, **Jean-Claude CLEYET-MAREL** <sup>1</sup>, **Valérie GUERIN** <sup>2</sup>, **Louis DE LARY DE LATOUR** <sup>2\*</sup>

1 : Fertil'Innov Environnement ; 460 Rue Louis Pasteur ; 34790 Grabels.

2 : BRGM ; 3 avenue Claude Guillemin BP 36009 ; 45060 ORLÉANS cedex 2.

\* s.soussou@fertilinnov-environnement.com

\* l.delarydelatour@brgm.fr

## Résumé

Les éléments traces métalliques (ETMs) dans les sols constituent une préoccupation majeure en raison des risques potentiels pour la santé humaine et les écosystèmes. Des approches impliquant la phytostabilisation ont donné des résultats intéressants pour limiter le transfert des ETMs par érosion hydrique et éolienne. Sur les anciens sites miniers, garantir l'atteinte des performances (taux de couvert végétal, limitation des flux solides, etc.) peut être difficile en raison non seulement des concentrations élevées en polluants métalliques mais également à cause de la faible fertilité du substrat. Chaque site étant un cas particulier, le recours à la phytostabilisation doit être raisonné et adapté aux contraintes particulières du site à traiter. Pour valider le recours à la phytostabilisation, des essais de faisabilité sont communément réalisés.

Le présent article expose les résultats de l'étude de faisabilité menée sur 2 zones de l'ancien site minier du Bois Vert sur la commune d'Abbaretz (44) pour valider la faisabilité du recours à cette technique et pour définir la meilleure approche de phytostabilisation en vue de gérer les transferts par érosion. Cette étude de faisabilité a intégré des essais en pots au laboratoire et des essais sur site.

Au final, après 3 ans, les essais sur site ont montré que la phytostabilisation des deux zones d'études est envisageable. Le suivi des parcelles a permis de sélectionner les espèces végétales (ligneux et herbacées) pour chaque zone et de mettre en évidence des points d'attention opérationnels pour une mise en œuvre à grande échelle.

## Introduction

Les anciennes exploitations minières ont engendré des friches caractérisées par des substrats présentant de fortes teneurs en ETMs, des carences en matières organiques et éléments minéraux essentiels à la croissance des végétaux, le tout générant des sols très dégradés et un paysage fortement impacté avec une absence quasi-totale de végétation (Madhupriya et al., 2020). De ce fait, les sites miniers abandonnés peuvent être à l'origine d'impacts environnementaux et sanitaires, d'autant plus s'ils sont situés à proximité de villages et/ou entourés par des terres agricoles. Les transferts vers l'environnement des polluants issus des déchets miniers peuvent notamment être dus à des phénomènes de drainage minier acide (DMA), de dispersion éolienne et d'érosion hydrique (Cidu et al., 2009 ; Resongles et al., 2014 ; Sims et al., 2013).

La topographie, la texture des résidus miniers, le couvert végétal, les conditions climatiques et la gestion du site sont des facteurs importants qui influencent la dispersion des ETMs dans les différents compartiments des écosystèmes (García-Rizo et al., 1999). Les évènements pluvieux intenses ainsi que les faibles couverts végétaux amplifient les processus érosifs. La restauration et la réhabilitation de ces sites par des méthodes physico-chimiques avec des approches conventionnelles de génie civil sont à la fois très délicates et extrêmement coûteuses (Berti & Cunningham 2000). Une alternative plus en accord avec les principes du développement durable est d'associer des stratégies de génie civil et d'ingénierie écologique afin de créer une couverture végétale capable de prévenir l'érosion des sols et limiter les transferts (Jacquemin et al., 2006). Toute opération impliquant la phytostabilisation, doit permettre de créer un technosol fertile favorable à l'installation d'un couvert végétal.

L'ancien site minier du Bois Vert est localisé sur la commune d'Abbaretz (44) à environ 1 km au nord-ouest du bourg (Figure 1). Ce gisement d'étain a fait l'objet d'exploitations très anciennes, dès l'époque gallo-romaine, mais l'exploitation principale a été réalisée à ciel ouvert de 1952 à 1957, générant environ 3,7 Mm<sup>3</sup> de résidus et stériles miniers.

Parmi les conséquences environnementales générées par cette activité minière, le drainage minier acide (DMA) et l'érosion des résidus sont les principales voies de transfert vers l'environnement devant être gérées sur ce site.

Le site a une surface totale d'environ 45 ha et trois zones peuvent être distinguées (Figure 2) :

- Un terril dit conique composé de stériles de découverte et d'exploitation ;
- Un terril dit tabulaire constitué de plusieurs dépôts. Ce terril comporte une végétation clairsemée. Il est soumis à une très forte érosion (éolienne et hydrique) entraînant localement la formation de ravines de plusieurs mètres de profondeur avec transport de matériaux ;
- Une zone située au nord du site présentant des résidus relativement fins oxydés, de couleur orangée. À ce niveau se trouve un DMA. Un réseau de fossés et des lagunes y sont présents pour collecter les eaux provenant du site. Dans cette zone, située en aval hydraulique du site, les résidus sont la plupart du temps humides voire saturés.

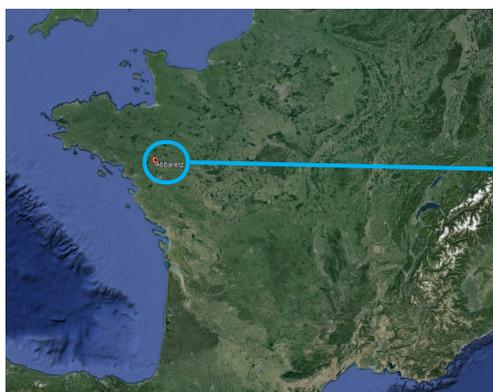


Figure 1 : Localisation du site.

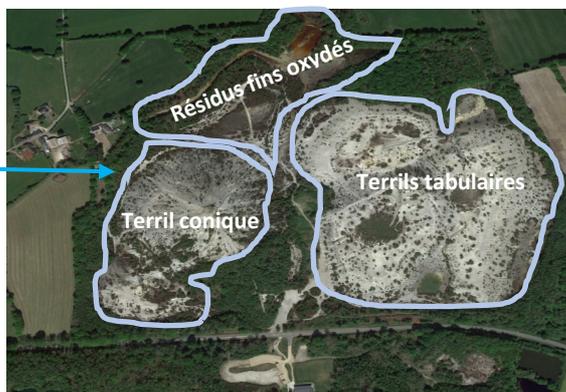


Figure 2 : Vue aérienne du site.

Les résidus miniers constituent un substrat sablo-limoneux sans fertilité et globalement incompatible avec la croissance des plantes. En effet, le substrat est acide (pH eau 4-5), très pauvre en matière organique (<0,5 %) et en minéraux, et présente une réserve utile très faible. De plus, le substrat est très peu perméable, ce qui peut entraîner une stagnation de l'eau. Ces propriétés ont pour conséquence une faible stabilité structurale du substrat, ce qui le rend particulièrement vulnérable à l'érosion.

Le principal polluant identifié est l'arsenic. Les concentrations mesurées dans les résidus sont en moyenne de plusieurs centaines de mg/kg. Localement, certaines mesures atteignent 1 400 mg/kg.

Le Département Prévention et Sécurité Minière (DPSM) du BRGM, en tant que maître d'ouvrage délégué de l'Etat, est missionné pour mettre en sécurité ce site. Parmi les mesures envisagées figurent des solutions de réhabilitation innovantes impliquant une végétation adaptée pour limiter les transferts vers l'environnement.

Le présent article présente une synthèse des étapes de gestion, des méthodes utilisées, des résultats obtenus et des défis rencontrés dans l'application de la phytostabilisation sur le site minier d'Abbaretz. Sur ce site, l'approche par phytostabilisation a été retenue dans l'objectif principal de maîtriser les sources de polluants en limitant les transferts par érosion hydrique et éolienne. Une limitation des transferts hydriques du fait de la phytostabilisation est aussi attendu, qui devrait limiter la production du DMA.

## Matériel et méthodes

## **Zones étudiées**

Dans le cadre de l'essai de faisabilité, deux zones du site avec des conditions contrastées ont été étudiées :

- La zone des résidus fins oxydés, qui présente une zone humide avec des eaux très acides (pH≈3) ;
- La zone du terril tabulaire, qui présente une zone exposée au vent et à la sécheresse.

## **Méthodes**

L'approche de mise en œuvre de la phytostabilisation sur l'ancien site minier d'Abbaretz a comporté plusieurs phases :

- Diagnostic végétal initial : un inventaire botanique a été réalisé sur site, ainsi que des coupes pédologiques et des analyses dans des zones sans végétation et des zones avec végétation spontanée, de sorte à identifier les conditions permettant l'installation du couvert végétal ;
- Essais en laboratoire :
  - o Amélioration de la qualité du substrat minier : des essais en pots avec 3 espèces végétales et différents taux de matière organique (MO) et d'amendement calcaire, permettant de corriger les propriétés physico-chimiques du substrat, ont été réalisés.
  - o Essais de croissance : tests de végétalisation permettant de finaliser la définition de la composition du substrat optimal pour favoriser l'installation de végétaux. Une attention particulière a été portée à la maîtrise des coûts ainsi qu'à l'utilisation d'amendements locaux.
- Essais *in situ* : avant de procéder à la réhabilitation de l'ancien site minier, des essais *in situ* ont été réalisés afin de confirmer l'efficacité de l'apport des amendements et de tester l'association des différentes espèces végétales herbacées (10 espèces) et ligneuses (5 espèces) et microbiennes pour couvrir rapidement les différentes zones. Deux parcelles de 100 m<sup>2</sup> ont été mises en place à l'automne 2020 sur deux zones différentes : terril tabulaire et zones des résidus fins oxydés. Etant donnée la configuration des deux zones, la démarche appliquée pour la préparation du substrat de chaque pilote a été différente (incorporation au motoculteur ou mélange en tas à la pelle hydraulique) ;
- Suivi : un suivi des parcelles pilotes a été réalisé tous les trimestres au cours de la première année, et ensuite annuellement.

## **Résultats et discussion**

### **Diagnostic végétal initial**

L'inventaire botanique a montré une association de plantes pionnières acidophiles (bouleau, bruyère), ainsi que quelques herbacées (agrostis, fétuque, lotier). Les processus de végétation spontanée sont néanmoins trop lents pour permettre un recouvrement suffisant du site à court terme.

### **Essais en laboratoire**

L'analyse a confirmé la mauvaise qualité agronomique des substrats prélevés au droit du terril tabulaire, du terril conique et des résidus oxydés. La texture, avec une forte proportion de limons, rend le substrat asphyxiant pour les systèmes racinaires. Les analyses chimiques ont révélé des teneurs élevées en ETMs, notamment en aluminium et en arsenic. Les fortes teneurs en aluminium, associées à un pH acide, sont de nature à n'autoriser la croissance que de quelques rares végétaux adaptés à ces conditions.

L'étude de faisabilité en laboratoire a montré qu'il est possible de corriger le pH de façon efficace par l'apport d'amendements. Les amendements constitués de carbonate de calcium et de matières organiques ont entraîné une correction du pH et une bonne croissance des végétaux, comparé à un témoin sur sol non pollué. De plus, il a été vérifié que l'incorporation d'amendements n'entraînait pas de mise en solution des ETMs.

Les essais en laboratoire ont permis de valider le protocole à l'échelle du pot. Ces essais en laboratoire étant réalisés en conditions contrôlées, sans facteurs limitants tels que l'eau, il était nécessaire de valider la solution sur site pour confronter le protocole aux réalités de terrain.

### **Essais in situ**

Trois ans après la mise en place des parcelles pilotes de phytostabilisation :

- Il a été observé la mise en place d'un couvert végétal diversifié et dense (taux de recouvrement de 50 à 100 % suivant les saisons et les parcelles) permettant une bonne stabilité du substrat (Figure 3) ;
- Aucune figure d'érosion n'a été reportée sur les parcelles, tandis qu'aux alentours, de nombreuses figures actives ont été observées ;
- Les végétaux implantés ont été à même de réaliser leur cycle et d'assurer la pérennité des espèces ;
- Il a été vérifié que les transferts en ETM vers les parties aériennes des plantes sont limités au regard des teneurs dans les sols (concentration foliaire en As < 10 mg/kg de matière sèche) ;
- Globalement, il a été observé une stabilité de la teneur en matière organique dans le substrat, ce qui est interprété comme un indicateur de pérennité. En effet sur le long terme, la durabilité du système est liée au taux de matière organique du sol (Sheoran et al., 2013) (Figure 4).

Au final, les essais sur site ont montré que la phytostabilisation des deux zones d'études est envisageable. Le suivi des parcelles a permis de sélectionner les espèces végétales (ligneux et herbacées) pour chaque zone et de mettre en évidence de points d'attention opérationnels pour la mise en œuvre à grande échelle, notamment la gestion des épisodes de sécheresse, l'incorporation de l'amendement et la maîtrise des populations de rongeurs.



Figure 3 : Parcelles pilote de phytostabilisation sur le site d'Abbaretz à l'automne 2022.

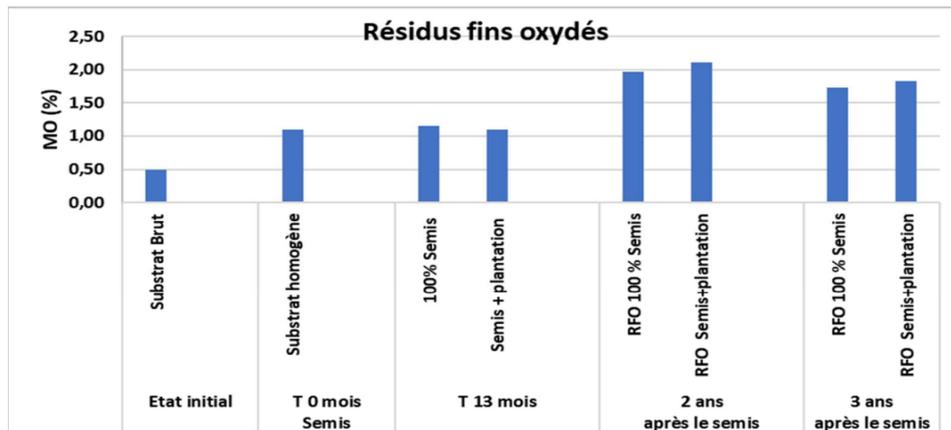


Figure 4 : Evolution des teneurs en MO dans le substrat du pilote au niveau des résidus fins oxydés.

### Conclusions et perspectives

Les études de faisabilité menées sur le site de l'ancienne mine d'Abbaretz ont démontré qu'une approche innovante de phytostabilisation pouvait être une solution de gestion pertinente pour des aspects environnementaux du site. Les résultats obtenus sur les parcelles tests soulignent plusieurs points cruciaux :

- Faisabilité d'un couvert végétal : 3 ans après, la végétation s'est bien développée sur les deux parcelles test, montrant la capacité de la phytostabilisation à créer les conditions favorables à un développement de la végétation et ce malgré deux années particulièrement sèches ;
- Gestion des transferts : la phytostabilisation a permis de réduire l'érosion hydrique. Ces résultats illustrent le potentiel de certaines espèces végétales à stabiliser le substrat ;

- Amélioration de la qualité du substrat : la solution mise en place a permis d'améliorer la structure du sol et de le stabiliser avec l'apport de matières organiques.

En conclusion, les études de faisabilité pour la phytostabilisation du site de l'ancienne mine d'Abbaretz montrent que les solutions basées sur des méthodes douces peuvent jouer un rôle clé dans la gestion des sites et sols pollués. En intégrant des approches scientifiques rigoureuses avec des pratiques durables, il est possible de transformer des paysages dégradés en écosystèmes fonctionnels, tout en minimisant les impacts environnementaux et en favorisant la résilience écologique.

Cette initiative reflète l'engagement à long terme pour la protection de l'environnement et la restauration de l'ensemble du site. En parallèle de ce travail, une réflexion est en cours pour évaluer la refonctionnalisation du sol. Pour cela, des tests par bioindicateurs notamment sont mis en œuvre.

Ces résultats ont été intégrés à un avant-projet de lutte contre l'érosion à l'échelle du site qui a défini les différentes actions à mener. Dans le cadre de cet AVP, il a notamment été préconisé la végétalisation ciblée de certaines zones du site. La phase PRO est en cours actuellement.

## Références

- Berti, W R., Cunningham, S D., 2000.** Phytostabilization of metals. *In Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean-up the environment*, Eds I Raskin and B D Ensley. pp 71-88. *John Wiley & Sons, Inc., New York.*
- Cidu, R., Biddau, R., Fanfani, L., 2009.** Impact of past mining activity on the quality of groundwater in SW Sardinia (Italy). *J Geochem Explor* 30: 125-132.
- García-Rizo, C., Martínez-Sánchez, J., Pérez-Sirvent, C., 1999.** Environmental transfer of zinc in calcareous soils in zones near old mining sites with semi-aridic climate. *Chemosphere* 39: 209-227.
- Jacquemin, P., Arguillat M., Tuphé R., Le Guen S., Boisson J., Pottecher G., Ruttens A., Vangronsveld J., Saunal B., 2006.** Une combinaison combinaison du confinement des déchets et de la phytostabilisation des sols. *Travaux* 831 : 56-66
- Madhupriya, M., Shyamala Gowri, R., Saranya, A., Rajarajeswari, P., Prabhavathi, P., Dinesh Kumar, S., 2020.** Remediation techniques for heavy metal contaminated ecosystem – A review. *J Adv Sci Res*, 11 (2): 01-09
- Resongles, E., Casiot, C., Freydier, R., Dezileau, L., Viers, J., Elbaz-Poulichet, F., 2014.** Persisting impact of historic mining activity to metal (Pb, Zn, Cd, Tl, Hg) and metalloid (As, Sb) enrichment in sediments of the Gardon River, Southern France. *Sci Tot Environ* 481: 509-521.
- Sheoran et al. (2013)** - Phytostabilization of metalliferous mine waste. *J Ind. Pollut. Control* 29(2):183–192.
- Sims, DB., Hooda, PS., Gillmore, GK., 2013.** Mining activities and associated environmental impacts in arid climates: a literature review. *Environ Pollut* 2: 22-43.

## Remerciements

Nous tenons à remercier les autorités locales de la commune d'Abbaretz pour leur coopération et leur soutien logistique.

Ces travaux ont été financés par le MTECT au travers de la subvention pour charge de service publique du DPSM.



**Yvelines**  
Conseil général

## **Le phytomanagement pour la gestion de la pollution et la valorisation écologique de la plaine de Chanteloup**

### **Phytomanagement for the pollution management and the ecological valorization of the “boucle de Chanteloup”**

Alexandre Perlein<sup>1</sup>, Perrine Bernard<sup>2</sup>, Philippe Schwab<sup>2</sup>, Anne-Laurence Agenais, Gaylord Machinet<sup>1</sup>

1 : Microhumus SARL, 3 allées de Chantilly, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy. [a.perlein@microhumus.fr](mailto:a.perlein@microhumus.fr) ; [g.machinet@microhumus.fr](mailto:g.machinet@microhumus.fr).

2 : GIP Seine & Yvelines Environnement. [pbernard@sy-environnement.fr](mailto:pbernard@sy-environnement.fr), [pschwab@sy-environnement.fr](mailto:pschwab@sy-environnement.fr).

3 : Département des Yvelines. [alagenais@yvelines.fr](mailto:alagenais@yvelines.fr)

**Mots-clés :** *phytostabilisation, ETMM, SNCRR, transfert sol-plante, Solution Fondée sur la Nature, diagnostic.*

#### **Objectif de la présentation :**

L'objectif est de présenter un cas d'étude de faisabilité technique de gestion par phytomanagement de la pollution par des éléments traces métalliques et métalloïdes (ETMM) des sols d'une ancienne plaine maraichère pour un nouvel usage comme site naturel de compensation, de restauration et de renaturation (SNCRR).

#### **Caractère innovant :**

La boucle de Chanteloup est une ancienne plaine maraichère de plus de 300 ha dont les sols de surface sont contaminés par des ETMM, dont le plomb, le zinc et le cadmium. La nature et l'étendue de la pollution des sols nécessitent un mode de gestion alternatif qui permettent à la fois la mise en sécurité du site et sa valorisation écologique adaptée au contexte local.

Nous discuterons des besoins spécifiques en termes de diagnostics agro-environnementaux pour évaluer la pertinence technique des phytotechnologies, notamment pour évaluer le transfert de certains ETMM des sols vers les couverts végétaux actuels du site (comportement excluant, accumulateur, hyperaccumulateur, espèces indicatrices) afin de définir la stratégie de valorisation écologique du site et la gestion de la pollution.

Dans ce cas d'étude, les transferts sols-plantes ont été évalués selon une méthodologie s'appuyant sur Perlein *et al.* 2023 qui considère plusieurs facteurs, comme les concentrations en ETM dans les parties aériennes des végétaux, les facteurs de bioconcentrations et des référentiels d'interprétations adaptés à la valorisation des phytomasses.

#### **Résumé :**

Le phytomanagement est une méthode de gestion holistique des sites et sols pollués combinant l'utilisation des phytotechnologies sélectionnées selon la typologie de la pollution et sa remédiation ou gestion ainsi qu'une valorisation supplémentaire du site pouvant être économique, écologique et/ou sociale. Les phytotechnologies sont des solutions fondées sur la nature pouvant aussi être connues sous le terme « plant based solution ». Via les processus physiologiques des plantes, elles permettent d'avoir une action sur les transferts de polluants dans les compartiments environnementaux (eau, air, sol, biosphère) et donc de gérer ces flux. Cela peut être une limitation de ces flux dans des stratégies

de phytostabilisation pérenne ou encore une remédiation des polluants dans des stratégies de phytoremédiation totale ou partielle.

La boucle de Chanteloup (~300 hectares), située à la jonction de 4 villes des Yvelines, est une ancienne plaine maraîchère historiquement polluée par les ETMM. Cette pollution des sols a pour origine l'accumulation progressive des ETMM issus des eaux usées de la ville de Paris épandus pour améliorer la fertilité du sol au XX<sup>ème</sup> siècle. L'activité maraîchère étant interdite par arrêté préfectoral depuis les années 2000, le département des Yvelines assisté par le GIP SYE a défini un plan d'aménagement de la boucle afin de valoriser ce site comme une zone naturelle de compensation, de restauration et de renaturation (SNCRR) au regard de la présence d'espèces d'intérêt patrimoniale caractéristiques des pelouses calcaires de sables xériques (EUR 15/2 6120, EUR 15/2 6120-1).

La faisabilité de cet aménagement écologique du site a été étudiée au regard des principes et objectifs du phytomanagement. La typologie des polluants et la fertilité des sols de la boucle de Chanteloup ont été caractérisées afin d'évaluer l'adéquation des phytotechnologies avec le site, ici la phytostabilisation et la phytoextraction des ETMM. Le diagnostic environnemental réalisé à l'aide de données issues de campagnes de prélèvement antérieures à l'étude, a mis en évidence une contamination hétérogène des sols de surface par des ETMM ayant une faible mobilité. Des zones ont été identifiées avec des enjeux de priorisation de gestions différentes, nécessitant un diagnostic complémentaire des sols ainsi qu'une fertilité non adaptée à l'export des phytomasses.

En parallèle, l'étude des habitats a permis d'identifier les espèces présentes et potentiellement d'intérêt dans le futur aménagement écologique de la boucle de Chanteloup.

L'ensemble de ces diagnostics a mis en évidence la faisabilité théorique du phytomanagement de la Boucle de Chanteloup via la phytostabilisation des ETMM dans les sols par des couverts végétaux adaptés à une valorisation écologique du site comme SNCRR.

Pour valider cette faisabilité théorique, les transferts sols-plantes n'ayant pas été évalués antérieurement par des mesures des concentrations dans les phytomasses du site, un diagnostic complémentaire des ETMM dans les phytomasses représentatives des différents habitats de la boucle de Chanteloup a été réalisé. Les résultats montrent un comportement globalement excluant des végétaux présents sur l'ensemble de la boucle de Chanteloup, par rapport aux ETMM présents dans les sols. Ce comportement excluant est retrouvé pour les espèces caractéristiques des pelouses calcaires de sables xériques d'Île-de-France, suggérant l'adéquation positif de cet habitat avec la phytostabilisation du site et la stratégie de phytomanagement envisagée.

Notons quelques exceptions qui ont permis d'identifier des espèces végétales inadéquates pour une stratégie de phytostabilisation, caractérisées par des transferts supérieurs à des concentrations physiologiques ou phytotoxiques en Cd ou Zn dans les phytomasses.

#### **Références :**

EUR 15/2 6120, description des « pelouses calcaires de sables xériques » (consulté le 25/11/2024). [https://inpn.mnhn.fr/habitat/cd\\_hab/2858](https://inpn.mnhn.fr/habitat/cd_hab/2858).

Eur 15/2 6120-1, description des « pelouses pionnières à post-pionnières sur sables silico-calcaires plus ou moins stabilisés » (consulté le 25/11/2024). [https://inpn.mnhn.fr/habitat/cd\\_hab/8988/tab/description](https://inpn.mnhn.fr/habitat/cd_hab/8988/tab/description).

Perlein, A., Bert, V., de Souza, M.F. *et al.* Field evaluation of industrial non-food crops for phytomanaging a metal-contaminated dredged sediment. *Environ Sci Pollut Res* **30**, 44963–44984 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24964-9>.



INTERSOL, 25-27 mars 2025 - Lyon, France

**Traitement in-situ d'une pollution au Mercure par désorption thermique.**

**Mercury in-situ treatment by thermal desorption**

**Matthieu SANGELY<sup>1</sup>, Laurent THANNBERGER<sup>1</sup>, Pierre-Louis GUILLERM<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>VALGO, 25, avenue de Larrieu, 31100 TOULOUSE, France,

<sup>2</sup>Ramboll, immeuble le Karré, 2, rue Maurice Moissonnier, 69120 VAULX-en-Velin

Contact : [matthieu.sangely@valgo.com](mailto:matthieu.sangely@valgo.com) ; +33 69106258

**Mots clés :** Traitement in-situ, Désorption thermique, Mercure, travaux sous tente.

**Objectifs :** Traiter un sol pollué par du Mercure principalement élémentaire par désorption thermique tout en maîtrisant parfaitement les aspects sécurité et environnementaux.

**Caractère innovant du projet :** Traitement in-situ d'un sol jusqu'à 10 m de profondeur pollué par du Mercure.

### **Introduction et objectifs du projet**

La désorption thermique (TD) est une technique de traitement visant à éliminer le polluant de la matrice en modifiant les équilibres de phase par une élévation de la température. Autrefois appliquée dans des centres spécialisés, VALGO a participé au développement d'une technique mobile, pouvant être mise en œuvre sur site ou in situ, pour éviter le transport excessif de matières dangereuses, et donner un meilleur bilan carbone.

Ce projet de réhabilitation a fait l'objet d'un dimensionnement impliquant des pilotes de laboratoire. Il a été ensuite mis en œuvre sur le terrain. Cette présentation montrera comment l'équipe locale de VALGO a réalisé ce transfert jusqu'à la récupération de tonnes de mercure pur, en évitant les travaux de terrassement. Un focus sur le bilan carbone sera également proposé

### **Caractérisation du site et de la pollution**

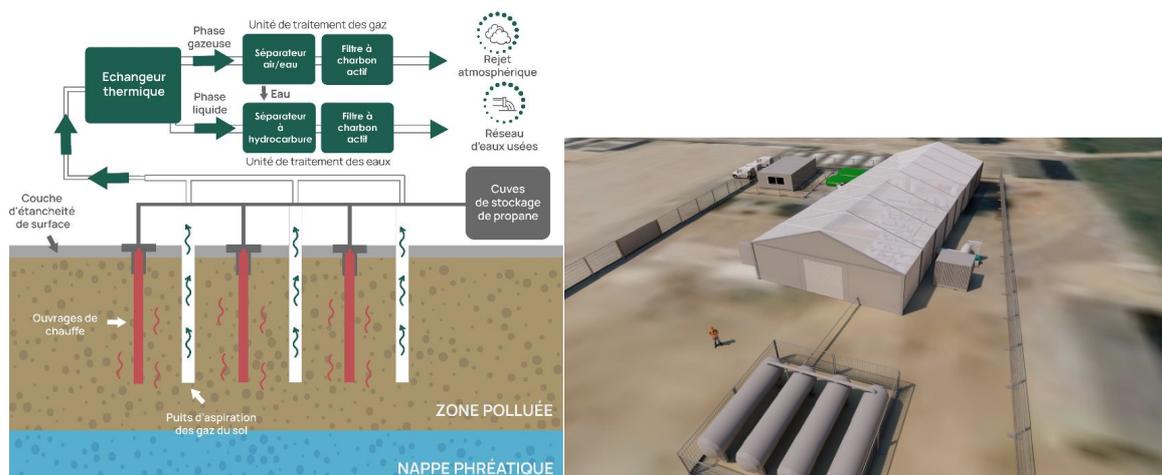
Dans la vallée du Rhône, une ancienne usine chimique, a produit, pendant des décennies, de nombreuses spécialités de composés organique. Aujourd'hui, la majeure partie du site est en reconversion et doit être assainie avant la cession.

Les campagnes d'échantillonnage ont mis en évidence la présence de 4 zones impactées par du mercure, avec des concentrations entraînant de forts enjeux sanitaires et environnementaux (jusqu'à 17 g/kg de matière sèche). Des billes de mercure métalliques sont visibles dans les échantillons fortement impactés. La zone source occupe une surface de 130 m<sup>2</sup> jusqu'à une profondeur de 10 m, contenant une estimation de 2 à 3 tonnes de mercure.



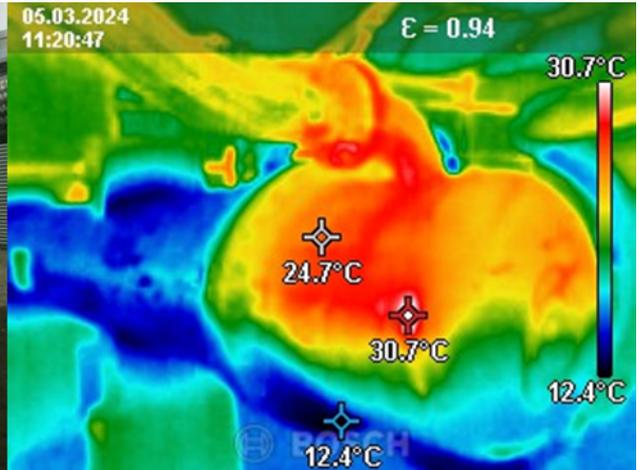
## Stratégie de remédiation

En raison de la profondeur de la pollution, de la faible offre de filière hors site, un traitement par désorption thermique in situ a été proposé et la faisabilité a été prouvée par les tests de laboratoire de VALGO. La température cible a été établie autour de 450°C et nos modèles numériques ont permis de dimensionner la partie aéraulique et thermique du traitement.



## Mise en œuvre des travaux

Au total, ce sont 40 puits de chauffage qui ont été forés et complétés par 15 ouvrages de venting. Pour éviter tout risque de dispersion du Mercure, l'intégralité du traitement a été réalisé sous une tente de confinement. Le Mercure a été séparé via un dispositif dédié puis stockés dans un container spécialisé avant évacuation. L'effluent gazeux a été traité via un charbon actif spécifique et une tour de lavage en finition.

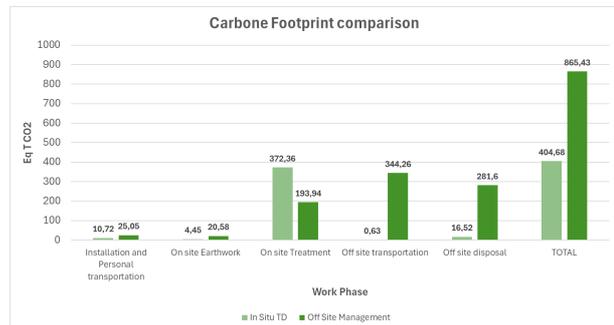
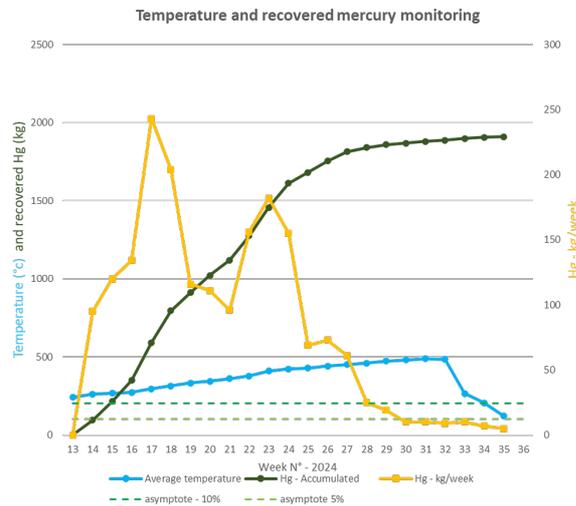


## Résultats

Au démarrage du chauffage, la température a augmenté rapidement, conformément aux prévisions modélisées. Six semaines après le début de la chauffe, nous avons commencé à récupérer continuellement du mercure dans les condenseurs. Au total, ce sont environ 2 T de Mercure qui ont été collecté.

Le suivi des rejets et de la qualité de l'air ambiant ont permis de valider l'absence totale de nuisance causée par les opérations de traitement.

Enfin le bilan carbone montre une économie de plus de 50 % des émissions par rapport à un scénario de traitement hors site.



## **Reconversion des friches : comment concilier réhabilitation, enjeux de préservation de la biodiversité et renaturation ? l'exemple de la ZAC Bongraine, Aytre (17)**

### **Conversion of brownfields: how to reconcile rehabilitation, issues of preserving biodiversity and renaturation? the example of the ZAC Bongraine, Aytre (17)**

Gaëtan URVOY, Directeur d'affaires « Sites et Sols Pollués » - EODD Ingénieurs Conseils

171, rue Leon Blum  
Centre médical Leon Blum  
69100 Villeurbanne  
Mobile : 06.73.41.67.57  
[g.urvoy@eodd.fr](mailto:g.urvoy@eodd.fr)

#### **Objectifs/Résumé**

La reconversion en écoquartier de l'ancienne friche ferroviaire de Bongraine à Aytré (17), sous maîtrise d'ouvrage de la Communauté d'Agglomération de La Rochelle (CDA), à nécessité de relever trois défis majeurs :

- Une réhabilitation de « plusieurs étages du sol » : sols de surfaces à mâchefers, sols intermédiaires à vestiges industriels, sols profonds à pollution organiques,
- Des travaux de dépollution conditionnés, dans leur conception et leur phasage, au respect de la grande histoire de ce site (découvertes archéologiques) et aux cycles biologiques complexes d'espèces protégées telles que l'Azuré du Serpolet (papillon) et l'Odontite de Jaubert (plante),
- De la nécessité d'une refunctionalisation des sols, conséquence indirecte des sols mis à nu par les opérations de dépollution et qui ont vu leur fertilité s'appauvrir.

## Optimising Remediation Efforts with accurate data and targeted Spin injection

Jeroen Vandenbruwane<sup>1</sup>, Lionel Counet<sup>2,1</sup>, Pieter Buffel<sup>3</sup>.

Les études de pollution de sol et projets de dépollution suivent à peu près tous la même trajectoire depuis les premiers sondages, jusqu'à la conception des travaux, trop souvent dictée par un seul critère de décision aux mains du client final : l'argent.

Il est vrai que la concurrence dans le milieu est dure, tant pour les bureaux d'études que pour les entreprises de dépollution. Par ailleurs, la thématique des pollutions de sol est encore trop souvent minimisée, ou incomprise, négligée. Il revient donc au bureau d'études de pouvoir répondre aux obligations légales du dossier tout en étant techniquement efficace pour remettre un prix concurrentiel voire très concurrentielles et remporter le marché.

De ces optimisations réalisées par les bureaux d'études pour limiter les coûts, limiter donc le nombre d'ouvrages et d'investigations sur le terrain, et il en ressort souvent des études de caractérisations qui sont « administrativement » complètes pour être validée par les Autorités mais parfois limitée techniquement. Là où se pose le problème, c'est si le dossier s'oriente vers un projet de dépollution. Les manquements techniques ou imprécisions vont alors littéralement augmenter les incertitudes, diminuer l'efficacité du traitement, allonger les délais de traitement, augmenter (fortement) les coûts et cela s'accompagnent souvent d'une perte de confiance du client parfois irréversible. Il ne sera jamais assez répété aux acteurs de la dépollution qu'augmenter la précision des données au niveau de la caractérisation et injecter plus de temps et d'argent, dans ce qu'on appelle le *Remedial Design Characterization* (RDC) est crucial pour permettre non seulement de cibler les interventions de dépollutions, afin de réaliser non seulement des économies mais qui plus est d'espérer des objectifs de dépollution bien meilleurs. Le tout réside dans le dialogue avec le client en aval afin d'avoir sa confiance.

Au travers d'un projet concret de dépollution d'une grande pollution en solvants chlorés dans lequel le Plan de Conception Travaux prévoyait des injections en plusieurs barrières (6), Injectis, après analyse du dossier et réalisation du pilote d'injection, a pu convaincre l'entreprise de dépollution et le client final, tous réunis autour d'une même table (et c'est important) qu'une recaractérisation permettrait de savoir réellement où injecter et redéfinir un design optimum et échelonné dans le temps. Cette RDC a pu rapidement être réalisée par EniSSA et sa technique de pointe de caractérisation MIP équipé du GC-MS. La présentation illustrera de manière comparative les deux scénarios : PCT initialement prévu avec le PCT revu après la réalisation de MIP, une vue en coupe et en 3D sera présentée ainsi que les économies réalisées aux niveaux des paramètres d'injections. Un projet où le dialogue entre les différents acteurs est un élément clé indispensable ce qui a grandement facilité les interventions de chacun pour pouvoir avancer en confiance et économiser près de 25% (100k€) sur le PCT initiale avec des garanties d'objectif augmentée de plus de 40%.

1. Injectis NV, Toekomststraat 15, B-9890 Dikkelvenne, Belgium

2. Injectis NV, Carrer de Sardenya 229, 08013 Barcelona, Spain

3. EniSSA NV, Gorislaan 49 B-1820 Steenokkerzeel, Belgium

# MISE EN ŒUVRE D'UNE SOLUTION D'ELECTROREMEDIATION FENTON OPTIMISEE

## Application avec la technologie EBR® (ELECTRO-BIO-REMEDIATION)

Philippe OUDIN : SEMACO Environnement  
Elie ELGRESSY: Elgressy Engineering Services Ltd.

La technologie EBR est une technique d'oxydation chimique in situ en zone saturée basée sur la réaction d'Electrofenton.  
La méthode d'Electroremédiation Fenton Optimisée décrite par le BRGM permet le traitement des polluants organiques en zone saturée par oxydation par des radicaux OH créés par voie électrochimique par la réaction de Fenton. Cette approche a été décrite en 2004 par *Mehmet et al*<sup>1</sup> pour son application au traitement des micropolluants persistants dans les eaux usées.  
Le but de cette proposition de communication est de présenter la méthodologie pratique de mise en œuvre sur le terrain de cette approche notamment au niveau des tests études préalables et des essais pilote.

La technologie EFO fonctionne avec le procédé d'oxydation de Fenton afin de dégrader ou minéraliser les polluants.  
La présente proposition de présentation ne concerne que les polluants organiques sachant que l'EFO permet également le traitement des ETM dissous.

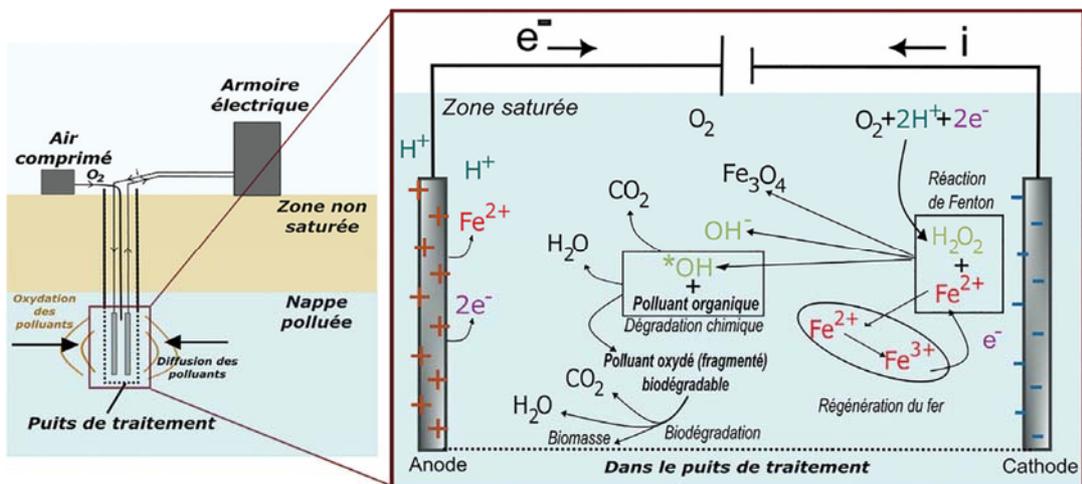
### La réaction de Fenton

Cette réaction de Fenton passe par une oxydation du fer de l'anode<sup>[1]</sup>, qui réagit ensuite avec le peroxyde d'hydrogène, produit dans le cas de l'EBR par le réacteur, pour former un radical hydroxyle<sup>[2]</sup>. Du Fer II est par la suite régénéré électrochimiquement au niveau de la cathode<sup>[3]</sup>. Ce processus est optimisable par modification du courant électrique.

Durant ce processus, de la magnétite ( $Fe^{II}Fe^{III}_2O_4$ ) est produite, dont la structure tétraédrique présente des sites ferriques avec des propriétés particulières, notamment une forte adsorbabilité des oxyanions à la surface de la magnétite et une modification de la configuration de surface de la magnétite et donc de sa réactivité.

La réaction de Fenton crée des radicaux qui peuvent ainsi dégrader les polluants qui facilite leur biodégradabilité sans détruire l'écosystème microbologique du sol.

D'autre part, la déchloration électrochimique du trichloroéthylène (TCE) peut également être réalisée par une autre voie telle que par électrolyse simple grâce à une anode de Fe (déjà présente pour la réaction de fenton), qui induit une forte réduction du potentiel Red/Ox (ORP).



Source BRGM

<sup>1</sup> l'actualité chimique - août-septembre 2004 - n° 277-278

Nous proposons de présenter la mise en œuvre de cette technologie en détaillant notamment les étapes préalables au dimensionnement et aux essais pilotes à mettre en œuvre dans différentes situations et notamment :

- Un site en fonctionnement
- Une pollution accidentelle en zone sensible

Les étapes suivantes de la mise en œuvre seront détaillées en commençant par les essais de traitabilité. En effet, pour des polluants non conventionnels, ces tests permettront de déterminer la cinétique de dégradation. Ces tests sont réalisés en batch.

Des essais pilotes sont ensuite réalisés sur site dans le but d'obtenir une corrélation entre la cinétique de dégradation et la perméabilité de l'aquifère.

Enfin, les modalités de suivi seront présentées sur la base d'un retour d'expérience d'un site en activité bénéficiant d'une installation EBR depuis 5 ans.

### Organisation de la présentation :

La présentation sera organisée sur un parallèle entre une méthodologie théorique classique et « académique » avec la mise en œuvre liminaire de la méthodologie, et une méthodologie en mode dégradé ou la mise en œuvre est réalisée sans les études préalables mais avec des enjeux à protéger.

En conclusion, les futures évolutions de la technologie seront présentées notamment au niveau de l'optimisation des électrodes.



Photos des tests des électrodes

### Références

- **Zaviska, F., Drogui, P., Mercier, G., & Blais, J.-F.** (2009). Procédés d'oxydation avancée dans le traitement des eaux et des effluents industriels : Application à la dégradation des polluants réfractaires. *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol 22 (n°4).
- **Oudin, P., & Elgressy, E.** (2018). EBR as an Advanced Environmental Technology Incorporating Various New Electrochemical Methods Underlying New Frontiers in Groundwater Remediation. *Conférence Contaminated Sites Management in Europe (CMSE)*, Nancy, France.
- **Oudin, P.** (2021). Test de traitabilité de plusieurs polluants persistants (POP) par électro-oxydation : essais comparatifs sur diverses familles de composés (PFAS, HVOCS, PCB). *Conférence INTERSOL 2021*. Gérant – Semaco Environnement & Professeur à l'École des Mines de Nancy.

## **Captages d'eau potable et pollution : comment contenir et traiter les impacts ?**

Gabriel PHILIBERT  
Chef de projet  
Mobile : 07 60 01 43 42  
[gabriel.philibert@cer.colas.fr](mailto:gabriel.philibert@cer.colas.fr)

COLAS ENVIRONNEMENT  
Antenne de Paris  
36 Boulevard de la Bastille - 75012 Paris

**Vivre avec la pollution est depuis de nombreuses années une problématique qui impacte les écosystèmes et la santé humaine. Le passif industriel de certaines régions géographiques a par exemple induit la pollution des eaux souterraines et/ou de cours d'eau qui peuvent dans certains cas faire l'objet d'utilisation pour les besoins des populations.**

C'est là que Colas Environnement intervient en tant qu'acteur de la dépollution des sites et sols pollués. La méthodologie nationale permet une approche classiquement admise d'étude des sources, des vecteurs et des cibles. Dans le cas de captages d'eau destinée à la consommation humaine, des impacts en molécules polluantes peuvent être repérés dans des taux élevés dépassant les normes en vigueur. Ces concentrations non acceptables peuvent provenir d'un panache de pollution engendré lui-même par une source de pollution et/ou une pollution concentrée. L'eau en tant que vecteur permet en quelques dizaines d'années (parfois moins) le transfert des polluants par dissolution vers les cibles : les consommateurs.

Dans ce contexte, COLAS ENVIRONNEMENT est intervenu sur plusieurs sites pour mettre en sécurité des captages impactés par d'anciennes pollutions en coupant les voies de transfert, en extrayant ou traitant les sources de pollution et zones de pollution concentrée.

Pour illustrer ces propos, COLAS Environnement présentera deux retours d'expérience significatifs.

Le premier est issu d'un retour d'expérience acquis sur plusieurs années dans le cadre de la réhabilitation d'un site industriel en activité de plus de 300 Ha. Dans ce cas précis, un captage d'eau potable avait dû être arrêté après la découverte de concentrations anormales en COHV notamment en son droit. Les investigations menées avaient permis de mettre en exergue des impacts significatifs dans le sous-sol du site incriminé tant au droit de la zone non saturée qu'au droit de la zone saturée de 2 à 30 m de profondeur, constituée d'une nappe superficielle et une nappe profonde.

En premier lieu, nos équipes ont mis en œuvre plusieurs barrières hydrauliques de pompage permettant de contenir les panaches de pollution.

Sur ce site, plusieurs zones sources ont également été traitées par pompage / venting, par extraction sous vide (extraction multi-phases) ou encore par injections (biodégradation anaérobie ou lessivage).

Au droit d'un second site, une problématique similaire de pollution d'un captage d'eau potable aux cyanures a été mise en évidence il y a plusieurs années.

L'ancienne usine de production de cyanures qui a cessé son activité en 1951 a en effet causé des impacts significatifs au droit des sols. Lors de travaux de réaménagement d'une zone du site en 1989 pour la création d'un centre commercial, des opérations de chaulage de terres pour permettre la création de remblais techniques avaient été effectuées avec des terres probablement impactées. Celles-ci ont ainsi relargué des cyanures par lixiviation impactant dès lors plus de 35 m d'épaisseur de sous-sol.

Des traces de cyanures ont par la suite été détectées dans le captage d'eau potable situé en aval hydraulique imposant une gestion des eaux impactées au droit du site. COLAS Environnement exploite ainsi depuis plusieurs années une unité de pompage / traitement des eaux impactées permettant la fixation du panache de pollution et la préservation de la qualité des eaux en aval.

Ces deux exemples qui seront détaillés techniquement lors de cette intervention illustrent l'importance de sauvegarder voire traiter la ressource en eau dans le cas de découverte de pollutions liées à l'histoire industrielle locale.

Gabriel Philibert, COLAS Environnement  
Jonathan SENECHAUD, COLAS Environnement

# Retours d'expérience sur l'application du guide ESTRAPOL

## Lessons learned on the application of the ESTRAPOL guidelines

**Emmanuel VERNUS<sup>1</sup> - Directeur technique,**  
**Annelise GAUTHIER<sup>2\*</sup> Responsable – Directrice de projets**

<sup>1</sup> : INSAVALOR – Plateforme PROVADEMSE, Campus LyonTech La Doua – 12 avenue des Arts, Bat Suzanne Mériaux 69621 Villeurbanne Cedex, emmanuel.vernus@provademse.com

<sup>2</sup> : GINGER T-LAB, 1030 Rue JRGG de la Lauzière 13290 Aix-en-Provence, a.gauthier@groupeginger.com

### Introduction

Les essais de faisabilité de traitement s'inscrivent dans la Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués et ont pour objectif de sécuriser les techniques de dépollution avant mise en œuvre des travaux, par la réalisation d'essais en laboratoire et/ou sur le terrain. Le guide ESTRAPOL [1], sorti en 2020, a pour objectif de définir des éléments de cadrage permettant d'harmoniser les pratiques et protocoles d'essais afin de se prononcer sur la pertinence d'une technique de traitement selon un contexte donné (site, sol, pollution) ainsi que sur ses performances.

Le choix des techniques de traitement repose sur des critères objectifs et vérifiables. Les essais associés sont répartis en deux catégories : les essais d'orientation et les essais de performance tels que décrits dans le guide méthodologique de Plan de Conception de Travaux [2]. Dans le guide ESTRAPOL, 14 techniques de traitement et 1 technique de gestion ont été sélectionnées. Seuls quelques essais les plus usités ont été retenus ici et sont essentiellement des essais d'orientation (E2) et/ou de performance (E3). Ils concernent les techniques de traitement suivantes :

- La désorption thermique,
- Le lavage des sols à l'eau ou avec des tensio-actifs
- La stabilisation
- L'oxydation chimique,
- La biodégradation aérobie dans la zone non saturée

### Représentativité de l'échantillon

La pertinence des résultats des essais réalisés en laboratoire ou sur le terrain repose sur la qualité et la représentativité des échantillons prélevés dans la zone à traiter. Les principaux obstacles à la constitution d'un échantillon représentatif pour essais sont le changement d'échelle, l'hétérogénéité de constitution des sols et l'aspect potentiellement très ponctuel des pollutions.

De ce fait, il est recommandé de réaliser une caractérisation détaillée des zones à échantillonner et à traiter sur le terrain, mais également d'adapter le sous-échantillonnage à réception des échantillons au laboratoire.

Il est également important de définir clairement la stratégie adoptée pour la préparation des échantillons à tester, tenant compte de l'hétérogénéité des sols et de la pollution.

### Retours d'expérience sur quelques essais

#### Désorption thermique

La désorption thermique in situ est une technique d'extraction de polluants basée sur l'effet combiné d'une élévation de température du sol pour volatiliser les polluants semi-volatils et d'une mise en dépression de ce sol pour les acheminer vers un dispositif de traitement des effluents gazeux. Elle concerne donc principalement les polluants en équilibre entre les phases gazeuse et solide ou liquide.

La simple détermination de la teneur en MOT, considérée comme un paramètre critique dans le guide ESTRAPOL, peut s'avérer décisive quant à la faisabilité de la désorption thermique.

D'autre part, l'évaluation des performances en laboratoire de la désorption thermique in situ peut être rendue plus pertinente en réalisant les essais dynamiques en four tubulaire sous légère dépression.

#### Lavage

Le lavage in situ (= soil flushing) consiste à faire percoler une solution de lavage (eau avec ou sans additif) dans le sol, pour extraire les contaminants de la zone saturée et/ou non saturée par désorption ou mise en solution.

Lors des essais statiques en batch, une évaluation de l'influence du temps de contact ainsi que de la température peut permettre de mieux dimensionner les essais en colonne et de limiter éventuellement l'utilisation de tensio-actifs.

De plus un traitement par lavage en deux séquences peut s'avérer plus efficace.

Dans le cas d'un ajout de réactifs pour optimiser l'extraction de polluants, il peut se produire un effet déstructurant sur le sol. Cette conséquence sur l'intégrité de la matrice de sol doit être mentionnée et éventuellement corrigée selon les objectifs du traitement.

## Stabilisation

La stabilisation/solidification est une technique consistant à limiter la mobilité des polluants présents dans le sol au moyen de mécanismes chimiques et/ou physiques. Elle s'adresse en priorité aux polluants métalliques mais peut aussi être envisagée pour des polluants organiques et pour des anions comme les sulfates.

Pour que l'opération de stabilisation physico-chimique testée en laboratoire puisse être mise en œuvre sur site, il convient d'avoir à l'esprit les conséquences technico-économiques de formulations complexes pouvant nécessiter l'apport complémentaire de différents réactifs et/ou de proportions importantes de réactifs.

La stabilisation est souvent associée à la solidification consistant à réaliser des blocs monolithiques à partir du sol ce qui conduit à une modification majeure de l'état de la matrice. La stabilisation peut également être envisagée pour aboutir à la formation de granulats solidifiés permettant de réutiliser sur le site un matériau granulaire éventuellement surmonté d'une couche végétale. Dans ce cas, il est préconisé de vérifier la stabilité physico-chimique des granulats stabilisés au contact d'une eau d'infiltration ayant préalablement été en contact avec la couche végétale supérieure ainsi que l'impact des granulats stabilisés sur le développement végétal.

## Oxydation chimique

Les essais d'oxydation chimique en laboratoire reproduisent une dégradation physico-chimique de polluants organiques sous l'action d'oxydant. Ces essais sont réalisés en deux phases successives : DSO (Demande du Sol en Oxydant sur un sol sain) et DTO (Demande Totale du sol en Oxydant sur un sol pollué). Le résultat de la 1<sup>ère</sup> conditionnant la faisabilité technique et économique de la 2<sup>nde</sup>, car une DSO > 5% massique peut être considérée comme rédhibitoire pour la réalisation d'un traitement par oxydation.

Pour les essais d'oxydation chimique en laboratoire, il apparaît primordial de bien réaliser les 2 phases de DSO et DTO et de tester plusieurs oxydants, pour conclure quant à l'efficacité du traitement et son applicabilité technique et économique. Dans le cas d'une utilisation du persulfate, du fait de sa potentielle dégradabilité, la réalisation d'une DSO permanganate est pertinente. La lithologie, le pH et la concentration en COT vont impacter l'efficacité du traitement qu'il serait intéressant d'étudier sur un plus large panel de mesures et d'essais.

## Biodégradation aérobie dans la zone non saturée

La biodégradation aérobie sur site est réalisée sur des terres extraites, contaminées par des polluants organiques, et mises en andain ou en biotertre. L'activité bactérienne endogène des terres est étudiée en vue de son optimisation pour favoriser la dégradation des composés organiques présents. Cette activité est fortement influencée par la présence d'oxygène et de nutriments dans le milieu.

Pour les essais de biodégradation aérobie en laboratoire, plusieurs paramètres peuvent influencer l'activité bactérienne endogène : la teneur en eau, le pH, la présence de phase organique, la lithologie du sol, le structurant utilisé, l'apport de nutriments... L'étude de la part des phénomènes de volatilisation ou de dégradation des composés légers dans les premiers temps de mesure pourrait fournir des informations sur l'efficacité du traitement et mériterait d'être consolidée sur un plus grand panel d'essais.

## Conclusions et perspectives

De nombreux essais en laboratoire ont été réalisés par différents organismes : laboratoires, entreprises de travaux, bureaux d'études, depuis la parution du guide ESTRAPOL en 2019. Quelques exemples d'essais, orientations d'interprétations, points d'attention ou biais de mesure sont présentés ici, à partir du retour d'expérience de PROVADEMSE et de GINGER T-LAB. Un panel plus large d'essais et de prestataires permettrait de consolider cette analyse, afin de conforter l'interprétation de ces essais, d'adapter les suivis en vue de la rationalisation et de l'optimisation de la mise en œuvre de traitements pleine échelle et envisager éventuellement une actualisation du guide ESTRAPOL.

Des caractérisations détaillées complémentaires, au stade des diagnostics de pollution comme des essais en laboratoire ou sur le terrain, permettraient de réduire certains biais ou incertitudes, voire les coûts des travaux de traitement. Mais cela nécessiterait de bien cadrer et délimiter les apports de telles caractérisations au regard des gains et optimisations des traitements.

## Références

[1] ADEME, 2019, « Projet ESTRAPOL - Essais de faisabilité de traitement de sols pollués », Rapport ADEME Expertises, 193p.

[2] Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 2019 « Guide Méthodologique relatif au Plan de Conception des Travaux (PCT) », MTES, ADEME, INERIS, BRGM.

## **Réalisation d'essais pilote dans le cadre d'un projet de transformation d'un ancien site industriel en futur espace résidentiel**

### **Carrying out pilot tests as part of a project to transform a former industrial site into a future residential space**

#### **Résumé**

Dans le cadre de la transformation d'un ancien site industriel en futur espace résidentiel, Brézillon réalise un vaste programme de dépollution in-situ et de gestion des déblais pour redonner vie à ce lieu historique.

En intégrant le principe de régénération urbaine – reconstruire la ville sur la ville – Brézillon contribue à la revitalisation d'un espace urbain, tout en réduisant l'empreinte environnementale du projet.

Le site, occupé par une entreprise de peinture et de vernis de 1875 à 1994, fait l'objet d'une transformation ambitieuse. Voici les principales interventions réalisées par Brézillon pour cette reconversion :

- Gestion durable des déblais liés à l'implantation de sous-sols, avec un accent sur la valorisation des matériaux excavés.
- Traitement in-situ des pollutions concentrées dans les sols, incluant le venting pour les contaminants (COHV/BTEX).
- Traitement des eaux souterraines par injection (ISCO) pour éliminer les polluants (COHV).

L'objet de l'intervention portera sur le retour d'expérience des équipes R&D de Brézillon qui ont mené en amont des tests de pompage, d'injection et de venting, ainsi que des essais de traitabilité en laboratoire sur les terres prélevées sur site pour affiner les solutions de dépollution en fonction des besoins spécifiques du terrain.

Intervenant :

Didier Prodorutti - Direction ingénierie

[d.prodorutti@brezillon.fr](mailto:d.prodorutti@brezillon.fr)



# Qualité de l'Air : de la recherche aux solutions opérationnelles

- Identification des sources et leur contribution à la pollution de l'air
- Expositions et Impacts • Solutions opérationnelles

# Air Quality: from research to operational solutions

- Identification of sources and their contribution to air pollution
- Exposures and Impacts • Operational solutions

Conférences - Débats - Rencontres - Exposition  
Conferences - Debates - Meetings - Exhibition

[www.atmosfair.fr](http://www.atmosfair.fr)

15 & 16 octobre 2025 - Lille

En partenariat avec / In partnership with:



**APPEL**

À COMMUNICATIONS  
Date limite de candidature :  
30 avril 2025

**CALL**

FOR PAPERS  
Deadline for application:  
April 30, 2025

## Entreprises / Companies (2024):



## Institutionnels / Institutional (2024):





18, rue Jules César - 78420 Carrières-sur-Seine - France

Tél. : +33 (0)1 39 68 26 08

E-mail : [contact@webs-event.com](mailto:contact@webs-event.com)

[www.webs-event.com](http://www.webs-event.com)