

n°17 // Avril 2025

updsMAG

LE MAGAZINE DES PROFESSIONNELS
DE LA DÉPOLLUTION DES SITES



Union des Professionnels
de la Dépollution des Sites.

DOSSIER

**ESSAIS PILOTES & PLANS DE
CONCEPTION DES TRAVAUX (PCT) //**



// SOMMAIRE

Edito //	3
Dossier : Essais pilotes & Plans de Conception des Travaux (PCT)//	
PLAN DE CONCEPTION DE TRAVAUX DE DÉPOLLUTION dans le cadre d'une reconversion d'une friche industrielle pour un usage tertiaire.....	6
UTILITÉ DU PLAN DE CONCEPTION DES TRAVAUX dans le cadre d'une pollution historique en milieu hétérogène.....	9
LES ESSAIS PILOTES : une nouvelle spécialité pour des projets de dépollution moins risqués.....	13
DU LABORATOIRE AU TERRAIN : la plateforme PRIME pour le monitoring et la dépollution des eaux et des sols	15
ESSAIS PILOTES ET PCT DANS LE CADRE DE TRAVAUX DE RÉHABILITATION mené par l'ADEME sur un ancien site industriel dans l'Essonne (91)	18
BIEN EXPLOITER LES RÉSULTATS DES ESSAIS LABORATOIRE ET PILOTES TERRAIN.....	21
LES BIOINDICATEURS au service des sites et sols pollués	24
PLAN DE CONCEPTION DE TRAVAUX MULTI-TECHNIQUES établi avec les contraintes d'un projet d'aménagement	27
BIOPILE THERMORÉGULÉE pour améliorer le potentiel de dégradation des hydrocarbures récalcitrants.....	30
LA CLÉ D'UN DIMENSIONNEMENT RÉUSSI POUR UNE DÉPOLLUTION D'ENVERGURE : le partenariat entre Bureau d'Études et Entreprise de Travaux	33
IMPORTANCE DES ESSAIS PILOTES DE TERRAIN pour la sécurisation technico-économique des projets de réhabilitation	36
Actualité //	
LES DERNIÈRES PUBLICATIONS	38



UPDS MAG n°17 Avril 2025

Magazine édité par l'UPDS
Union des Professionnels de la Dépollution des Sites
183 avenue Georges Clémenceau 92000 NANTERRE
www.upds.org

Réalisation : UPDS

Comité de rédaction : Christel de LA HOUË, Franck LECLERC,
Yves GUELORGET, Nicolas FOURAGE, Jonathan SÉNECHAUD

Crédits photo : @UPDS @adhérents UPDS

Reproduction interdite sans accord de l'UPDS

// CALENDRIER 2025

Cliquez pour plus d'info

Intersol

25-27 mars 2025 à Lyon

NICOLE et PROMISCES spring WS

27 et 28 mars à Francfort

Groundwater Quality

10 au 13 juin 2025 à Bordeaux

Aquaconsoil

16 au 20 juin 2025 à Liège

PFAS international Congress

17 au 19 juin 2025 à Paris

Solscope

18-19 juin 2025 à Lyon



Pollutec

7-10 octobre 2025 à Lyon

21ème Journée Technique d'information et de retour d'expérience de la gestion des sites et sols pollués

4 décembre 2025 à Paris

// PUBLIER UN ARTICLE

Vous êtes un industriel, un aménageur, un établissement public foncier, un chercheur, un juriste, un institutionnel, un partenaire,... vous pouvez aussi contribuer à ce magazine !

Pour toute information :

upds@upds.org

// SUIVEZ-NOUS



// ÉDITO



Julien BRETON
Secrétaire de l'UPDS

Chères lectrices, chers lecteurs,
Chers partenaires, maîtres d'ouvrage et professionnels du secteur,
La gestion des sites et sols pollués est un métier d'équilibre, entre les exigences réglementaires, les incertitudes du terrain, les objectifs d'usage futur et les contraintes économiques.

Dans ce contexte complexe, les Plans de Conception de Travaux (PCT), appuyés par des essais pilotes rigoureux, s'imposent aujourd'hui comme des outils structurants, à la croisée de la rigueur scientifique et de l'ingénierie opérationnelle.

Ce numéro du magazine de l'UPDS met en lumière les nombreuses facettes de ces démarches, qui ne se limitent pas à un jalon technique dans la chronologie d'un projet.

Le PCT est avant tout un levier de maîtrise du risque, d'optimisation des moyens, et de sécurisation des engagements. Il permet de passer du diagnostic à l'action, en s'appuyant sur une connaissance affinée des milieux, des contaminants, et des procédés disponibles.

Les retours d'expérience que vous trouverez dans ce dossier en témoignent : qu'il s'agisse de projets de reconversion urbaine, de gestion de pollutions complexes en milieux hétérogènes ou de traitement in situ d'hydrocarbures volatils, le recours aux essais de faisabilité – qu'ils soient en laboratoire ou sur site – ouvre la voie à des traitements mieux dimensionnés, mieux acceptés et plus performants.

Le développement de ces pratiques appelle également à repenser les équilibres contractuels entre maîtres d'ouvrage, bureaux d'études et entreprises de travaux.

Il questionne nos modèles économiques, la temporalité des projets, la lisibilité des objectifs de dépollution, et invite à renforcer la transparence et la coopération entre tous les acteurs.

À l'UPDS, nous sommes convaincus que cette montée en technicité, alliée à une culture du retour d'expérience et à la mutualisation des savoir-faire, constitue une opportunité pour structurer durablement notre filière.

Elle contribue aussi à renforcer la confiance des parties prenantes, institutionnelles comme privées, dans notre capacité collective à rendre possible une reconversion sûre, durable et économiquement soutenable des friches industrielles et des sites impactés.

Enfin, ce numéro s'ouvre également sur plusieurs rubriques complémentaires qui illustrent la vitalité de notre syndicat et de notre secteur.

Quant à la rubrique actualité, elle dresse un panorama des publications et événements à venir – salons, congrès scientifiques, journées techniques – autant de rendez-vous où se construisent les savoirs, se confrontent les pratiques et se tissent les liens professionnels.

Nous poursuivrons donc nos efforts pour promouvoir ces approches intégrées, encourager l'innovation, et accompagner l'évolution des pratiques professionnelles dans un cadre partagé de qualité.

Bonne lecture à toutes et à tous !

// DOSSIER : ESSAIS PILOTES & PLANS DE CONCEPTION DES TRAVAUX (PCT)

PLAN DE CONCEPTION DE TRAVAUX DE DÉPOLLUTION

DANS LE CADRE D'UNE RECONVERSION D'UNE FRICHE INDUSTRIELLE POUR UN USAGE TERTIAIRE

Dans le cadre de la métamorphose d'un site au passé industriel en espace tertiaire, le plan de conception des travaux de dépollution des sols est la clé de voûte d'une reconversion réussie. Bien plus qu'une simple formalité administrative, ce document stratégique est le garant de la sécurité environnementale, de la viabilité économique et de la pérennité du projet. Il orchestre avec précision la transformation d'un héritage industriel potentiellement toxique en un terrain d'opportunités, assurant ainsi un avenir durable et sain pour les futurs occupants. Plongeons dans les enjeux cruciaux de cette étape fondamentale, où l'expertise technique rencontre la vision d'un futur prometteur.

L'ARAC Occitanie gère la reconversion d'une friche industrielle en Parc Régional d'Activités Économiques (PRAE Humphry Davy) à La Grand-Combe, dans le Gard (30). Le projet concerne 30 ha divisés en deux tranches, dont la première est subdivisée en 9 lots.

Le site, anciennement utilisé pour des activités liées au charbon, a fait l'objet de plusieurs diagnostics de pollution depuis 2012. Un Plan de Gestion (PG) a été établi en 2022 par EODD Ingénieurs Conseils et mis à jour en 2023, permettant l'obtention de subventions de travaux par l'État et l'ADEME dans le cadre des appels à projets "fonds friches".

Les mesures de gestion de la pollution préconisées dans le Plan de Gestion comprennent le traitement de 33 points de pollution concentrée, impliquant des pollutions organiques et métalliques, via diverses méthodes de gestion sur site et hors site. Il suggère également un tri et une évacuation des déchets de déconstruction sur certains lots, ainsi qu'un possible criblage des sols pour optimiser les volumes.

Dans ce cadre-là, le bureau d'études EODD Ingénieurs Conseils a été mandaté pour élaborer un Plan de Conception des Travaux (PCT) de dépollution, appuyé par des essais de faisabilité réalisés par SARPI Remédiation France, afin de valider et affiner les stratégies de gestion proposées dans le PG.

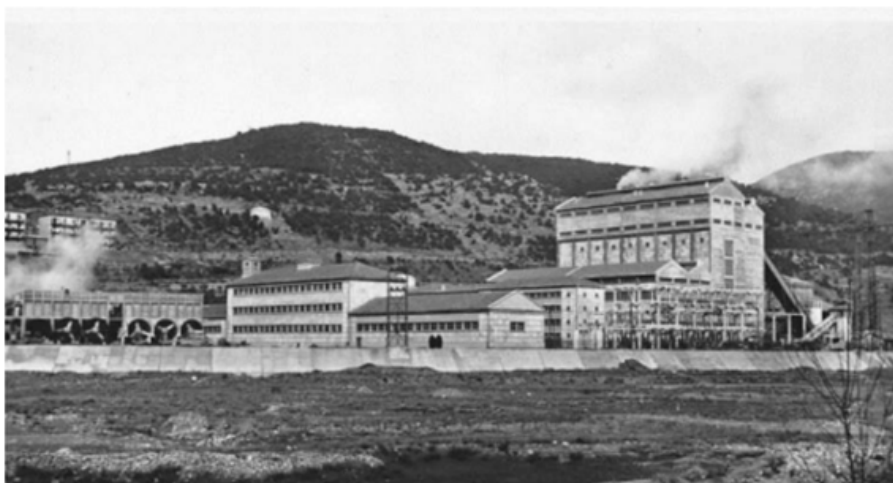


Illustration n°1 Photographie historique de la centrale du Fesc

LES MARQUES D'UN PASSÉ INDUSTRIEL

Le site a accueilli à partir de 1946 une centrale thermique exploitée par Charbonnages de France jusqu'en 1981 date d'arrêt de la centrale. Cette centrale a pour partie été reconvertie en usine de pulvérisation de charbon exploitée par la société CEVFARINE jusqu'en 1992 (Illustration n°1).

Le site a été déconstruit et mis en sécurité entre 2003 et 2006.

Les divers diagnostics de pollution effectués depuis 2012 ont révélé :

- Des anomalies diffuses en métaux (arsenic, cadmium, cuivre, mercure, plomb et zinc)
- Des contaminations ponctuelles significatives en hydrocarbures, HAP, BTEX et PCB.

Au global, 33 points de pollution concentrée (PPC) ont été identifiés. Les sols de ces PPC sont principalement composés de remblais sableux noirâtres contenant des schistes charbonneux et des débris de démolition. De nombreuses anciennes infrastructures restent également présentes dans les sols.

A la lumière des investigations, un Plan de Gestion (PG) a été établi par EODD

Ingénieurs Conseils en 2022, puis mis à jour en 2023. Il a permis de définir les mesures de gestion suivantes :

- Gestion des 33 PPC avec des seuils de coupures définis sur la base d'une analyse statistique (paramètres : Hydrocarbures C10-C40, HAP, BTEX, PCB, Arsenic et Mercure)

- 3 solutions de gestion :

- Solution 1 : gestion hors site de l'ensemble des PPC

- Solution 2 : gestion hors site + biopile pour une partie des PPC

- Solution 3 : gestion hors site + biopile + thermopile pour une partie des PPC

Afin de valider et affiner les stratégies et techniques de gestion proposées dans le PG, des essais de faisabilité ont dû être menés. Leurs résultats ont été exploités pour affiner le bilan coûts-avantages du PG et établir un Plan de Conception de Travaux (PCT).

LES ESSAIS EN LABORATOIRE ET SUR TERRAIN, SOCLE DU PLAN DE CONCEPTION DE TRAVAUX

Les essais de faisabilité réalisés par SARPI Remédiation France ont été menés de deux manières :

- En laboratoire : des essais de traitement des Points de Pollution Concentrés (PPC) :

- Par biopile : pour le traitement des pollutions hydrocarbonées (durée : 3 mois)

- Par mycoremédiation : pour le traitement des terres polluées par les HAP (durée : 3 mois)

- Par thermopile : pour le traitement terres polluées par les HAP et PCB (durée : 1 semaine - Illustration n°2)

- Sur site : un essai de tri et criblage des matériaux afin d'évaluer une possible optimisation des volumes à évacuer hors site et à traiter sur site (durée : 1 semaine)

Ces essais ont été riches d'enseignements puisqu'ils ont permis d'obtenir des conclusions essentielles à la construction du PCT.

- L'essai de traitement biologique des hydrocarbures (traitement par biopile) n'a



Illustration n°2 : montage de l'essai de désorption thermique en laboratoire

pas été concluant en termes d'abattement des teneurs en HC C₁₀-C₄₀ dans les sols testés, et ce malgré la biodisponibilité satisfaisante du polluant (près de 50% facilement biodisponible).

- L'essai de mycoremédiation des terres polluées par HAP n'a pas été concluant puisqu'aucun développement visuel de mycélium n'a été observé pour les 2 sols testés malgré des conditions favorables. De plus, aucun abattement des teneurs en HAP n'a été mis en évidence dans le témoin ou l'essai inoculé.

- L'essai de désorption thermique a été concluant en termes d'abattement des teneurs en HAP dans les sols testés. Le

traitement des HAP s'est avéré efficace dès 250°C avec un abattement global de 96% (teneur en HAP mesurée à 560 mg/kg MS à l'état initial, contre 25 mg/kg à l'état final). Par ailleurs l'efficacité croît avec la température, avec des abattements de 99,8% et 99,97% pour les essais à 350°C et 450°C respectivement.

Au regard des conclusions des essais, cela a permis d'orienter le PCT vers une solution de traitement des sols impactés par les HAP par désorption thermique. Par ailleurs cette technique est également efficace pour le traitement des HC C₁₀-C₄₀, des BTEX et des PCB.

- L'essai de tri et criblage des matériaux



Illustration n°3 : fraction intermédiaire issue du criblage



Illustration n°4 : fraction fine issue du criblage

sur site a été concluant puisqu'il a permis d'évaluer la part volumique de 3 fractions au droit de 13 des 33 PPC, mais également des sols du site faisant l'objet de terrassements généraux à des fins de viabilisation. En synthèse, il a été évalué :

- En moyenne 6 % de refus grossier (fraction > 200 mm);
- En moyenne 20 % de refus intermédiaires (20 mm < fraction < 200 mm) (Illustration n°3);
- En moyenne 74 % de fines (fraction < 20 mm) (Illustration n°4).

Au regard des conclusions de cet essai, les solutions de travaux se sont orientées vers un tri et criblage de l'ensemble des matériaux issus des PPC (6 500 m³ sans tri et criblage) afin d'optimiser la quantité de matériaux à traiter (moins de 5 000 m³ après tri et criblage), et de retenir le traitement thermique sur site comme solution alternative à l'évacuation en filière hors site autorisée pour les pollutions traitables par cette méthode.

Par ailleurs, cette démarche de tri, criblage et contrôle analytique a été complétée par



Illustration n°5 : Vue drone du chantier de traitement de la pollution - phase de gestion des PPC

un concassage et déferrailage des bétons de démolition, et appliquée à l'ensemble des 80 000 m³ de matériaux à excaver dans le cadre des travaux complémentaires de viabilisation des terrains, dans un objectif de réemploi et valorisation des matériaux en remblai sur site, avec contrôle de conformité aux seuils de coupure définis.

LE PLAN DE CONCEPTION DE TRAVAUX : UNE ÉTAPE IMPORTANTE SUR LA ROUTE DES TRAVAUX À PLEINE ÉCHELLE

Le Plan de Conception des Travaux (PCT) a été élaboré par EODD Ingénieurs Conseils en novembre 2023. Il a été le document central dans la construction du Cahier des Clauses Techniques et Particulières (CCTP) des travaux de traitement de la pollution des sols de l'OZE / PRAE Humphry Davy.

A ce jour, les travaux de traitement de la pollution sont en cours (Illustrations n°5 et 6) et consistent en un criblage fin (20 mm) des matériaux des PPC, un contrôle analytique robuste des matériaux, un traitement des PPC en filière hors site autorisée ou en traitement thermique sur site sur thermopile.

La solidité et la pertinence technique des solutions et préconisations définies au stade du PCT ont été éprouvées sur le terrain et leur faisabilité et efficacité est confirmée. Représentant moins de 2% du budget des travaux à pleine échelle, il est d'ores et déjà acté que les essais pilote et le PCT ont permis de significativement optimiser techniquement et financièrement le projet.



Illustration n°6 : Vue drone du chantier de traitement de la pollution - phase de traitement par thermopile DESOTHERM®

Alexandre LISZEWSKI (SARPI Remédiation)
François CAZEAUX (EODD Ingénieurs conseil)

// DOSSIER : ESSAIS PILOTES & PLANS DE CONCEPTION DES TRAVAUX (PCT)

UTILITÉ DU PLAN DE CONCEPTION DES TRAVAUX

DANS LE CADRE D'UNE POLLUTION HISTORIQUE EN MILIEU HÉTÉROGÈNE

Tout est parti d'un constat d'odeurs d'hydrocarbures par des riverains au niveau du réseau public d'assainissement. Il s'est avéré que la source provenait de la station-service d'un hypermarché. L'exploitant a alors identifié une fuite au niveau de la canalisation de transfert d'essence sans plomb entre la zone de dépotage et les cuves enterrées de stockage de carburants.

CONTEXTE GÉNÉRAL

Le site est localisé au cœur de la région Grand Est. À la suite de la découverte de cette fuite, des travaux urgents d'excavation de terres polluées ont été réalisés au niveau du parc à cuves en parallèle de la rénovation des canalisations de la station-service.

Les prélèvements des bords et fonds des fouilles confiés à KALIES ont mis en évidence une contamination encore élevée dans les sols de substances typiques entrant dans la composition des carburants (ETBE/MTBE, BTEX et HCT C_5 - C_{10}). Dans la fouille la plus profonde, une remontée d'eau témoignait du potentiel impact sur la nappe superficielle du fait d'une couleur et d'une odeur suspectes.

Dès lors, en réponse à la mise en demeure de l'autorité administrative, l'exploitant a engagé des études pour la caractérisation de la pollution à l'échelle du site (Figure 1).

En parallèle, un puits de pompage de la nappe avec un traitement des rejets par charbon actif a été installé au niveau du parc à cuves de carburants. Les premières analyses menées sur l'eau brute ont confirmé une pollution concentrée des eaux souterraines sur cette zone.

SYNTHÈSE DES DONNÉES ENVIRONNEMENTALES

Du point de vue hydrogéologique, le site repose sur des alluvions anciennes qui, dans le secteur d'étude, se composent de couches superposées d'argile et de sable grossier. Leur épaisseur est relativement

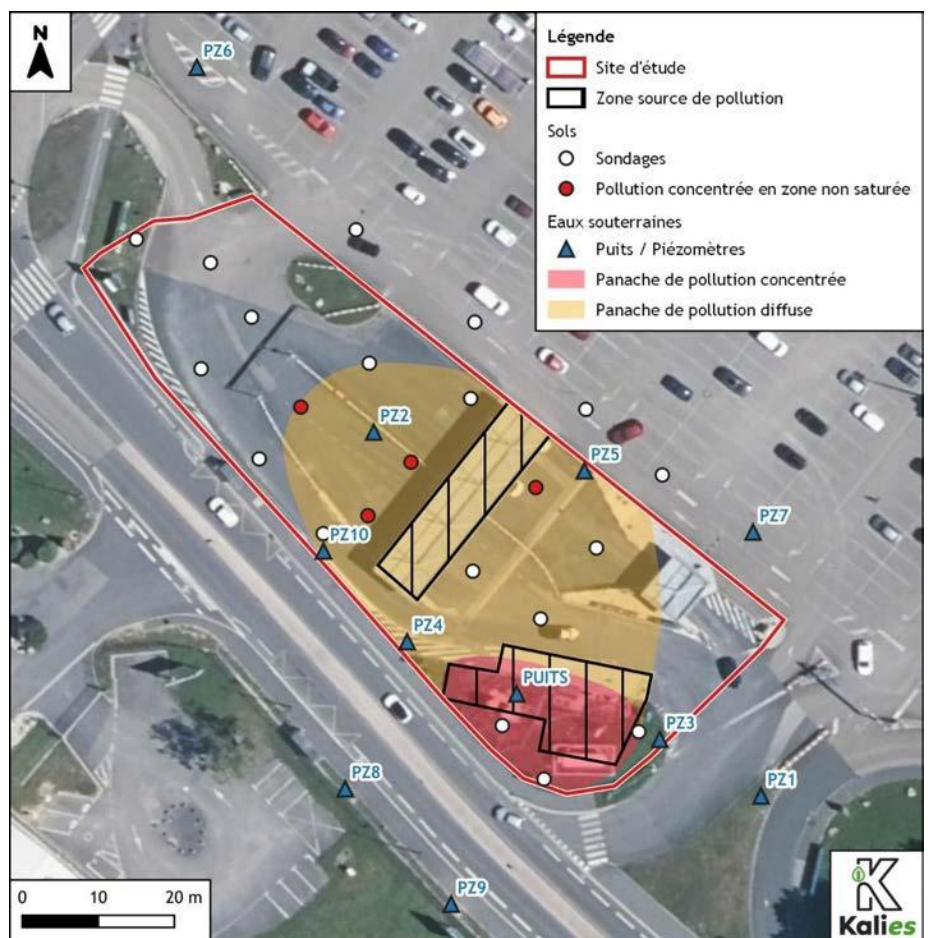


Figure 1 – Synthèse des données environnementales du site

faible avec un substratum marneux atteint entre 5 et 7 mètres de profondeur. Ces alluvions forment un aquifère dont la nappe est en majorité libre, de faible profondeur, et

en relation avec la Marne et ses principaux affluents.

Les investigations sur les milieux ont porté sur les sols, les eaux souterraines et superficielles (Figure 1).

Elles ont permis :

- D'identifier le parc à cuves comme une source de pollution, mais également l'aire de distribution par migration à travers les graviers d'enrobage des canalisations ;
- De mettre en évidence une hétérogénéité verticale et latérale des textures des sols ;
- D'observer un toit de la nappe entre 1 et 1,5 mètre de profondeur avec un battement saisonnier de l'ordre d'un mètre ;
- De cartographier le panache de pollution des eaux souterraines sur une surface de 1 750 m² ;
- De confirmer l'absence de migration hors du site des polluants, notamment par le rôle de barrière hydraulique du pompage dans le puits.

APPROCHE DE GESTION RETENUE PAR L'EXPLOITANT

S'agissant d'une pollution des sols et surtout des eaux souterraines par des hydrocarbures légers, deux approches se sont dégagées : soit un traitement hors site après excavation, soit un traitement in situ (venting/sparging ou oxydation chimique).

Dans tous les cas, le pompage-traitement a été maintenu afin de garantir l'absence de migration hors site du panache de polluants ou de tout sous-produit potentiellement généré par un traitement.

En concertation avec l'exploitant, l'approche in situ a été retenue car elle permettait de maintenir l'activité du site durant toute la durée du traitement, à l'exception des travaux d'installation. Toutefois, sa mise en œuvre nécessitait d'être validée par un ou plusieurs essais de faisabilité permettant également d'appréhender le contexte environnemental.

À ce stade, il était difficile de définir précisément des seuils de réhabilitation pour les eaux souterraines. Il a donc été proposé de les évaluer à l'issue des essais.

Après consultation de sociétés spécialisées, la solution de pilote retenue a été le biosparging à l'oxygène pur proposé par ORTEC SOLEO (combinaison de sparging et de biodégradation aérobie). Un schéma de principe est présenté en Figure 2.

Le sparging consiste à injecter de l'air sous le niveau de la nappe afin de le propager sous forme de bulles et favoriser la volatilisation des composés volatils. Pour

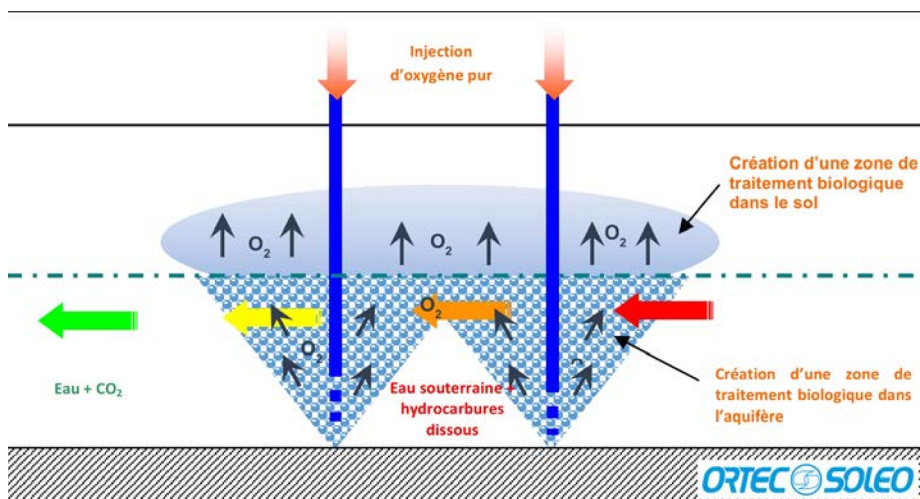


Figure 2 – Principe du biosparging

le traitement biologique aérobie, l'objectif est de créer des conditions favorables à la biodégradation des polluants par les microorganismes.

Dans notre cas, de l'oxygène pur est injecté en zone saturée par le procédé de sparging qui permet de modifier les équilibres de phase entre les polluants initialement présents en phase dissoute pour un passage en phase gazeuse. Cet ajout d'oxygène favorise le développement de la biomasse et permet une oxydation directe des composés en présence, contribuant chacun à l'abattement des concentrations de polluants.

L'oxygène va également migrer verticalement depuis la zone saturée jusqu'à la zone non saturée pour là encore oxyder les polluants et oxygéner le milieu, permettant un développement de la biomasse dégradant les contaminants en présence par voie aérobie.

Le processus d'oxydation de la majeure partie des composés organiques donne naissance à des sous-produits intermédiaires (hydroxylés, aldéhydes, cétones et acides carboxyliques) pour en fin de chaîne produire du dioxyde de carbone et de l'eau. Ces intermédiaires de biodégradation sont plus solubles, plus facilement biodégradables et moins toxiques que les molécules mères.

ESSAIS RÉALISÉS ET OBJECTIFS

Les essais suivants ont été réalisés dans le cadre du plan de conception des travaux :

- Laboratoire : Essais de respirométrie sur les sols et les eaux souterraines (ORTEC

SOLEO) ;

- Terrain : Chocs hydrauliques (KALIES) et pilote de biosparging (ORTEC SOLEO).

Les objectifs de ces essais étaient de :

- Vérifier l'applicabilité de la technique de biosparging ;
- Proposer un dimensionnement optimal de l'unité de biosparging à mettre en œuvre ;
- Conclure sur les objectifs possibles en termes d'abattement et de durée de traitement ainsi que les limites et contraintes associées.

CHOC HYDRAULIQUES

Afin de s'assurer que les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère sont adaptées à un traitement in situ, KALIES a réalisé des chocs hydrauliques. Le principe consiste à faire varier brusquement le niveau piézométrique dans un ouvrage et à suivre dans le temps son rééquilibrage (Figure 3).

Ces essais sont particulièrement adaptés aux aquifères pollués car ils évitent une gestion de l'eau d'exhaure. En revanche, ils

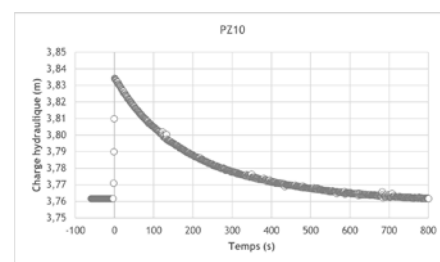


Figure 3 – Exemple de réponse à un choc hydraulique

ne permettent d'estimer localement que la perméabilité (K) et la transmissivité (T). Il faut par conséquent multiplier les essais, ce qui était adapté dans ce cas au vu de la densité du réseau piézométrique.

Les résultats ont mis en évidence une perméabilité assez homogène de 10^{-5} à 10^{-6} m/s sur la zone d'étude, jugée moyenne.

ESSAIS DE RESPIROMÉTRIE EN LABORATOIRE

Les échantillons préparés sont incubés pendant un temps durant lequel la quantité d'oxygène consommée par les microorganismes présents est mesurée (respiration). Ces essais permettent d'évaluer la faisabilité d'un traitement

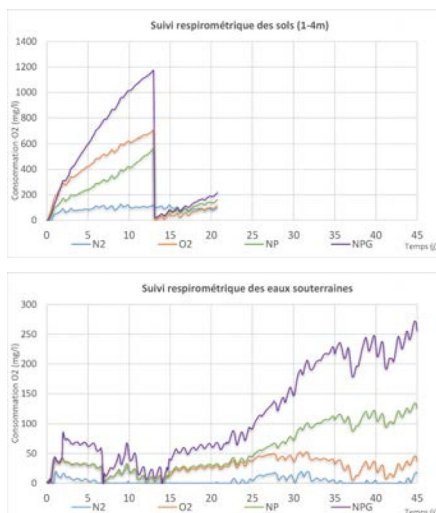


Figure 4 – Suivis respirométriques des sols et des eaux souterraines

biologique aérobie des sols ou des eaux pollués.

Les résultats présentés en Figure 4 démontrent une activité bactérienne déjà présente dans les sols avec un potentiel de respirométrie significatif. Pour les eaux souterraines, un temps de latence de 25 jours est observé pour l'activation de la biodégradation. Dans tous les cas, l'ajout de nutriments (NP/NGP) stimule la biodégradation aérobie.

PILOTE DE BIOSPARGING

Le piézomètre PZ5 a été retenu pour l'essai de terrain du fait de l'absence de contraintes pour l'activité du site et de réseaux enterrés. De plus, les concentrations relevées en BTEX étaient plus élevées dans cet ouvrage lors de la surveillance.

Une aiguille d'injection puis deux ouvrages de contrôle (OC) ont été forés à 6,5 mètres de profondeur (Figure 5).

L'unité d'essai associée était composée d'un skid de biosparging installé en aérien, comprenant un cadre de bouteilles d'alimentation en oxygène pur, une rampe d'injection séquentielle et un automate de pilotage d'injection (Figure 5).

L'objectif de ce pilote était d'observer le rayon d'influence de l'injection et d'estimer les abattements prévisionnels des polluants en conditions réelles.

Les résultats du suivi analytique sont présentés en Figure 6.

À la suite de cet essai de longue durée, il a été observé :

- Une bonne diffusion de l'oxygène à la fois dans l'eau et dans les gaz du sol ;
- Un temps de latence avant le démarrage de la biodégradation (observation corrélée avec les essais en laboratoire) ;
- Une décroissance des concentrations en polluants dans les eaux souterraines avec de très bons taux d'abattement ;
- Un élargissement du rayon d'action dans le temps.

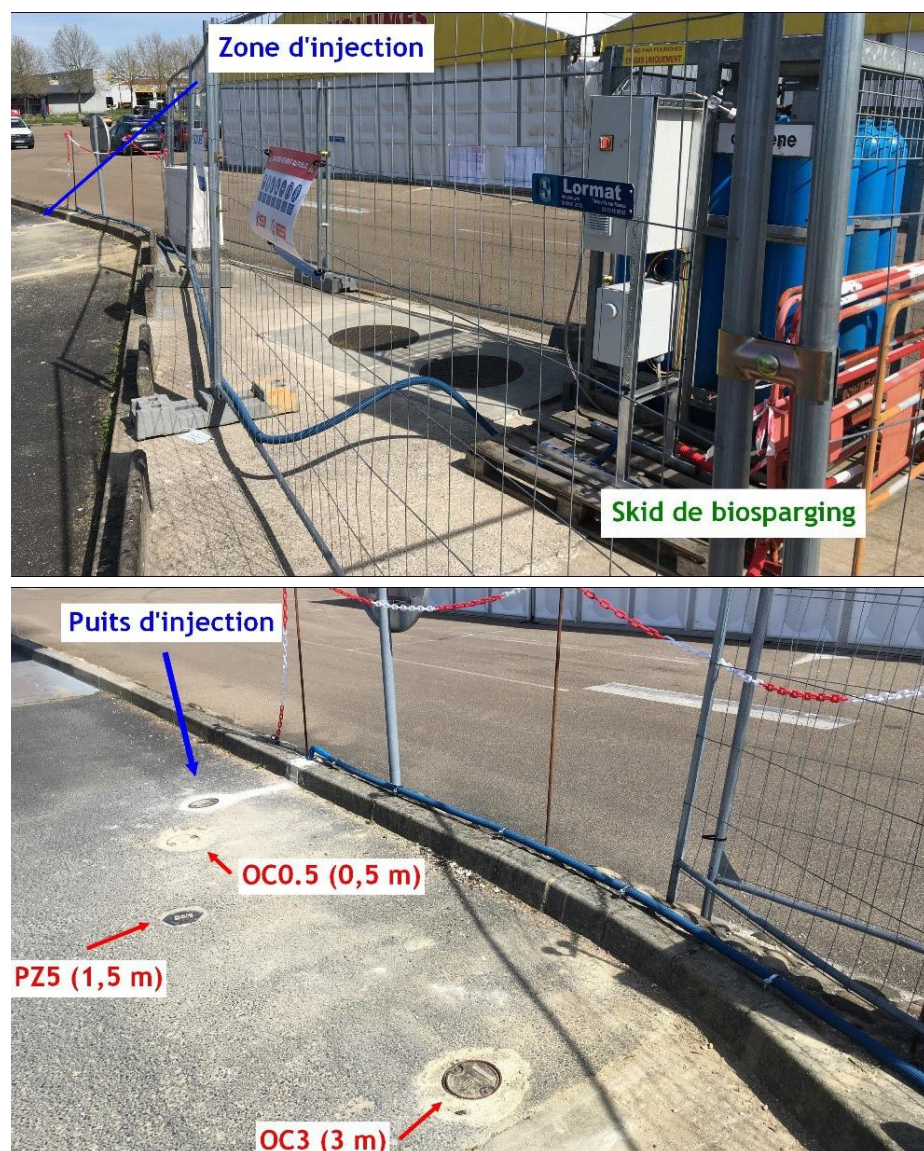


Figure 5 – Photographies du pilote de biosparging en place

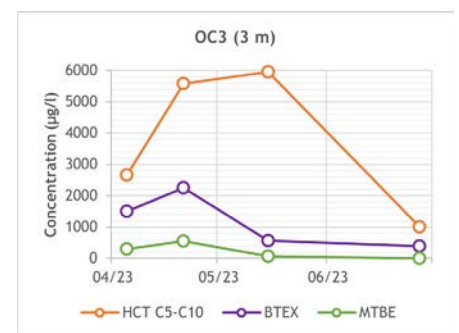
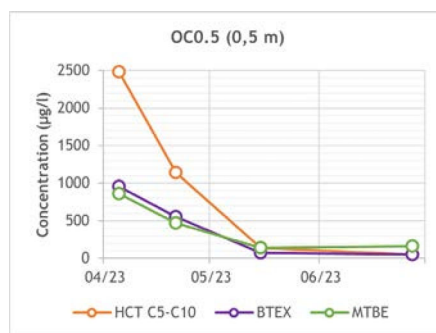
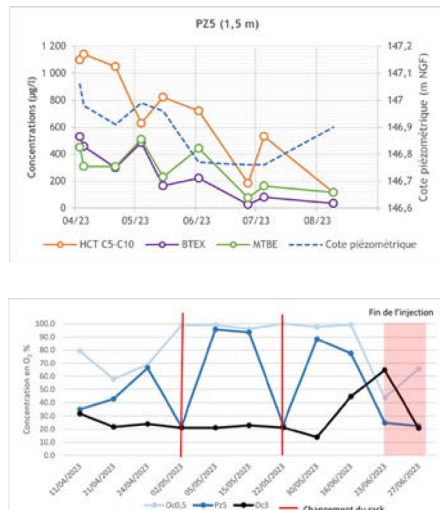


Figure 6 – Suivi analytique des eaux souterraines durant l'essai pilote

DIMENSIONNEMENT DU TRAITEMENT À PLEINE ÉCHELLE

En combinant la connaissance du site acquise au travers des investigations sur les milieux et les résultats des essais en laboratoire ou de terrain, le dimensionnement retenu est le suivant (Figure 7) :

- Optimisation du procédé par injection de nutriments dans les ouvrages existants ;
- Maillage par une vingtaine d'aiguilles dans l'emprise du panache, ancrées au mur de l'aquifère ;
- Choix d'un débit d'injection basé sur les résultats de l'essai de biosparging par paliers ;
- Cheminement des réseaux à travers des tranchées fermées afin de permettre la poursuite des activités du site durant le traitement ;
- Proposition d'une durée de traitement de 15 mois ;
- Proposition d'une approche pour surveiller d'éventuels effets rebonds ;
- Abattements prévisionnels dans les eaux souterraines de 80 % pour les BTEX et HCT C₅-C₁₀, 50 % pour les ETBE / MTBE et la valeur-seuil du SDAGE pour les HCT C₁₀-C₄₀ (1 mg/l).

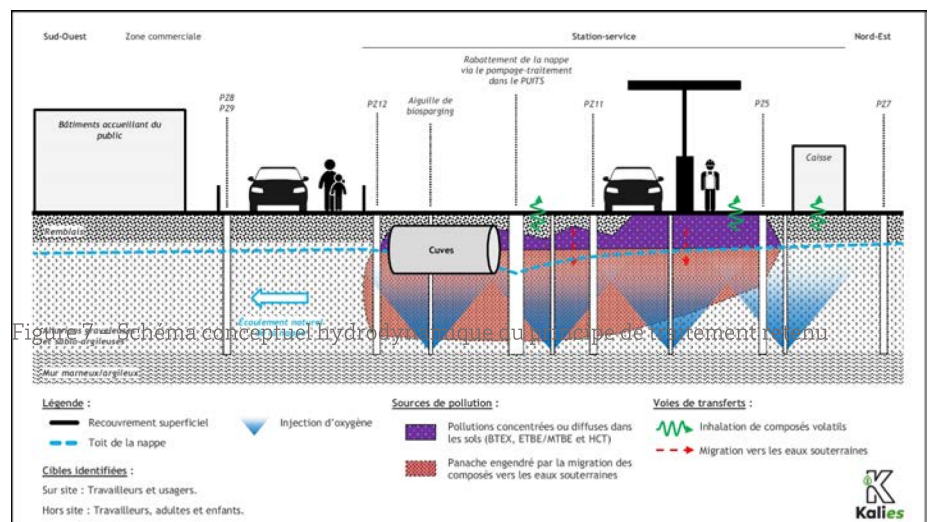


Figure 7 – Schéma conceptuel hydrodynamique du principe de traitement retenu

CONCLUSION

Dans le cas présent, la réalisation d'un plan de conception des travaux a représenté une enveloppe de l'ordre de 15 % du montant du traitement à pleine échelle.

Il a permis de s'assurer de la faisabilité technique de la solution retenue de concert avec l'exploitant.

Il a constitué également une sécurité pour le prestataire en charge des travaux qui a pu dimensionner au mieux le traitement et

s'engager sur des résultats au travers de seuils de réhabilitation réalistes.

À début 2025, le biosparging couplé au pompage-traitement mis en œuvre par ORTEC SOLEO fonctionne depuis huit mois.

Les résultats sont très satisfaisants, avec la grande majorité des ouvrages de surveillance affichant des concentrations en polluants désormais inférieures aux seuils de réhabilitation.

Julian IBBA (KALIES)

// DOSSIER : ESSAIS PILOTES & PLANS DE CONCEPTION DES TRAVAUX (PCT)

LES ESSAIS PILOTES : UNE NOUVEAU MÉTIER POUR DES PROJETS DE DÉPOLLUTION MOINS RISQUÉS

Après 16 ans consacrés aux travaux de dépollution, j'ai lancé il y a trois ans et demi la société ESTRALAB spécialisée dans les essais laboratoire et terrain pour la dépollution des sites. L'objectif était de créer :

- Un acteur spécialisé, développant une véritable expertise métier dans les essais,
- Et indépendant, fournissant des résultats réexploitables.

Tous ceux qui ont travaillé en dépollution des sols connaissent l'ampleur des aléas auxquels il faut faire face lorsque l'on mène un projet de dépollution :

- Découvertes fortuites : déchets purs, canalisations ou débris amiantés, structures enterrées;
- Inconnues du sol : Etendue et concentrations effectives des impacts, géologie, hydrogéologie;
- Acceptabilité des travaux par le voisinage : odeurs, poussières, bruit;
- Et enfin, rendement effectif des techniques envisagées sur site ou in situ.

Face à ces aléas, 2 solutions pour les clients :

- Les transférer aux entreprises de travaux avec le risque de chantiers bloqués, de dérives de planning et d'une perte de crédibilité vis-à-vis de l'administration,
- Ou les regarder droit dans les yeux et les traiter techniquement et contractuellement aussi loin que possible afin de maîtriser les coûts et les délais.

L'évolution en 2017 de la politique nationale de gestion des SSP est venue conforter la 2^{ème} approche avec la mise en place des Plans de Conception de Travaux incluant en particulier :

- L'établissement des données permettant de dimensionner les opérations de traitement (perméabilité, granulométrie, porosité, vitesse de nappe...) y compris leur plage de variation,



Essai pilote sur site de venting

- Et la réalisation d'essais laboratoire et / ou terrain permettant de vérifier la faisabilité des traitements et la cohérence entre les rendements atteignables et les objectifs du projet en termes de planning et valeurs cibles.

Il était temps car la rentabilité des entreprises de travaux de dépollution s'était dégradée de 32% entre la période 2012-2014 et la période 2019-2020, alors même que

l'évolution de leur Valeur Ajoutée comptable montrait que cette perte de rentabilité était associée à un surcoût de suivi des chantiers ! (valeurs calculées sur la base du RCAI de 8 leaders des travaux de dépollution).

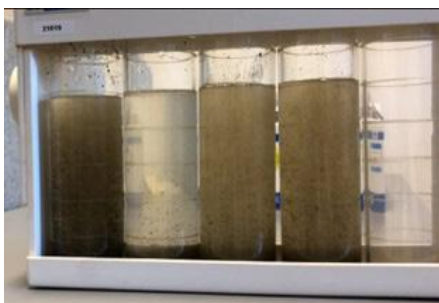
Après plus de 3 ans d'activité, un premier bilan de l'activité d'ESTRALAB en termes d'essais laboratoire et terrain peut être établi.

QUI DEMANDE CES ESSAIS ?

- Assez logiquement, ces essais laboratoire et terrain sont à 55% commandés par les bureaux d'étude dans le cadre des Plans de Conception de Travaux dont ils ont la charge.
- 17% de nos essais ont été réalisés directement pour des clients finaux qui choisissent de maîtriser l'ingénierie de leur projet et de lancer les essais à leur nom. Il s'agit là en général de clients disposant d'équipes SSP internes et donc à même de piloter ce type de projets.
- Les 28% d'essais restant ont été réalisés pour des entreprises de travaux qui se positionnent sur des PCT ou sollicitent ces essais dans le cadre de remises d'offres ou de démarrages de projets.



Essais de percolation multicouches



Essai de floculation de fines de lavage

QUELLES THÉMATIQUES POUR LES ESSAIS LABORATOIRE ?

Le tableau ci-dessous présente la répartition des techniques testées au laboratoire par grande famille de techniques.

55% des essais sont réalisés vis-à-vis de techniques ciblées :

- Biodégradabilité à 16%
- Oxydation ou réduction à 15%
- Désorption thermique à 10%
- Lavage à 9%
- Et stabilisation chimique à 5%

Il s'agit ici de vérifier et valider l'applicabilité d'une technique a priori retenue vis-à-vis du contexte du projet.

A l'inverse, 44% des projets portent sur des essais ouverts, souvent plus amont, où l'enjeu n'est pas de vérifier l'application d'une technique mais d'apporter des éléments permettant d'orienter les choix stratégiques futurs :

- 12% des essais portent sur des essais permettant une meilleure connaissance des matériaux;
- 15% des projets consistent à tester différentes techniques de manière ouverte sur les différentes problématiques et lithologies d'un site;
- 16% des projets portent sur le développement de solutions de traitement et la réalisation de tests parfois innovants.

Au niveau des essais terrain et compte tenu des enjeux financiers plus importants, les essais sont ciblés et visent à :

- Définir des paramètres terrain de venting ou de sparging,
- Vérifier une faisabilité d'injection et établir les rayons d'action,
- Fournir des paramètres de nappe (perméabilité, traçage) ou de mobilité de flottant.

LES PERSPECTIVES

La pratique des essais laboratoire et terrain est maintenant bien ancrée dans la manière d'aborder les problématiques de dépollution des sites.

Le besoin d'un métier spécifique des essais se confirme pour accompagner les phases de conception de projet en générant des données techniques à la manière des données de sol dans les projets



Colonne de stripping de laboratoire



Essai pilote sur site d'injection d'oxydant

géotechniques. Les bureaux d'étude et les entreprises de travaux sont bénéficiaires de cette approche qui réduit leurs risques.

Toutefois, un chemin de progrès reste encore à tracer notamment vis-à-vis des enjeux suivants :

- Améliorer la prise en compte de la variabilité des sites en réalisant les essais sur des échantillons plus nombreux. La majorité des essais sont actuellement réalisés sur la base de 1 à 3 prélèvements par site représentant 10 à 20 kg de sols, et ce pour des enjeux de quelques milliers à dizaines de milliers de tonnes.
- Renforcer le travail sur le changement d'échelle entre les essais laboratoires et le terrain en développant des protocoles d'essais laboratoire permettant déjà d'évaluer des paramètres opérationnels (renforcement des essais d'injection en colonnes, des essais de mixing, etc...).
- Travail entre professionnels des essais pour converger sur certaines approches méthodologiques.

Pierre-Yves KLEIN (ESTRALAB)

// DOSSIER : ESSAIS PILOTES & PLANS DE CONCEPTION DES TRAVAUX (PCT)

DU LABORATOIRE AU TERRAIN : LA PLATEFORME PRIME POUR LE MONITORING ET LA DÉPOLLUTION DES EAUX ET DES SOLS

La Plateforme pour la Remédiation, l'Innovation au service de la Métrologie Environnementale - PRIME - est spécialement conçue pour répondre aux enjeux du monitoring, de la dépollution des eaux souterraines et des sols pollués et de la construction ou refonctionnalisation de sols. Elle joue un rôle clé en tant qu'interface entre le laboratoire et le site pollué, offrant un environnement unique en Europe pour le développement et la validation de solutions à différentes échelles.

Initié et soutenu financièrement par la Région Centre-Val de Loire, ainsi que par l'Etat et le Fonds européen de développement régional, le programme PIVOTS est un ensemble coordonné de plateformes analytiques et expérimentales qui fédère des acteurs publics et privés de la métrologie et de l'ingénierie environnementale.

Parmi ces plateformes, la plateforme PRIME (Plateforme pour la Remédiation, l'Innovation au service de la Métrologie Environnementale) occupe un espace d'environ 1000 m² sur le campus du centre scientifique du BRGM à Orléans.

Ce vaste espace permet aux équipes de scientifiques et ingénieurs du BRGM, et notamment de l'équipe RSSP (Risques, Sites, et Sols Pollués), de mieux comprendre le devenir de la pollution des sols et des eaux, pour ensuite mieux la traiter grâce au développement de techniques de dépollution innovantes.

Le milieu souterrain où les pollutions se diffusent est par essence complexe et multi échelle.

A l'échelle de quelques microns ou moins, la porosité du sol, par exemple, n'est pas simple à appréhender. En effet, en fonction d'où on regarde, on se retrouve aussi bien dans le vide entre deux particules que sur une particule solide, alors que la porosité est sensée être le rapport entre le volume de vide sur le volume total !

Mais en dézoomant pour se placer à une échelle de quelques millimètres ou centimètres, qui englobe alors suffisamment de sols, ce concept prend tout son sens car il est possible de définir des volumes.

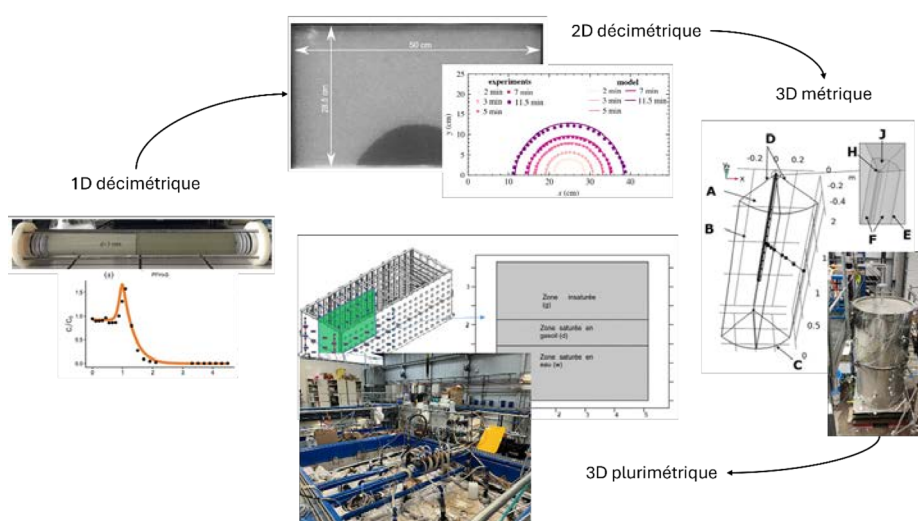


Figure 1 : Illustration des différentes échelles d'étude et des dispositifs associés typiquement utilisés au sein de la plateforme PRIME pour la mise au point de techniques de dépollution innovantes.

Seulement, en dézoomant encore, on peut alors observer des strates ou des lentilles de sols ayant des propriétés différentes, à des échelles allant de la dizaines de mètres au kilomètre.

Cette expérience de pensée permet d'appréhender à quel point les phénomènes prenant place dans les sols, et au premier titre la mise en place d'une pollution ou bien d'une technique de dépollution, sont rendus complexes par cet aspect multi-échelle.

Réduire l'incertitude devient alors essentiel, et pour ce faire les essais pilotes ont une place primordiale.

Dans le cadre de la R&D, il s'agit souvent de pouvoir isoler des phénomènes d'intérêt, en

adoptant une démarche "toute chose égale par ailleurs". Ce n'est pas facile lorsqu'on travaille dans un milieu aussi complexe.

Alors, aux différentes tailles de dispositif s'ajoute la possibilité d'annuler certaines dimensions de l'espace.

Par exemple, une colonne 1D permet de s'affranchir des effets de la gravité autant que possible, etc. Ces différentes échelles et les dispositifs associés sont schématisés dans la Figure 1 et présentés en détail ci-dessous.

L'ECHELLE SUBMETRIQUE POUR L'INNOVATION

Les colonnes décimétriques 1D (10 cm à 50 cm) sont utilisées dans les laboratoires de PRIME pour permettre de réaliser des expériences et d'acquérir des paramètres physiques, chimiques ou biologiques nécessaires à la compréhension des processus de transfert des polluants et au développement de procédés de dépollution.

Lorsque ces colonnes sont placées horizontalement on peut considérer que le déplacement d'un polluant ou d'un fluide quelconque est unidirectionnel (gauche/droite), et que l'influence de la gravité devient négligeable.

Cette dimension réduite est une composante essentielle des essais de R&D, car elle permet de multiplier les essais, et donc de faire varier les paramètres presque à volonté. A titre d'exemple, il n'est pas rare pour un même projet de réaliser plusieurs dizaines d'expériences en colonnes 1D.

Les phénomènes étudiés sont très variés, allant de protocoles très innovants à l'application stricte de normes nationales ou internationales (voir à ce sujet l'encadré ci-joint). Un autre type de dispositif à cette échelle est le bac 2D (2D décimétrique dans la Figure 1).

Ce dispositif permet d'intégrer la composante gravitaire dans l'étude des phénomènes, tout en conservant une taille réduite (quelques litres).

De plus, la surface plane vitrée permet de recourir à la visualisation des phénomènes, et même à la quantification des phases piégées via des techniques de traitement d'image.

L'ECHELLE METRIQUE POUR SE RAPPROCHER DU SITE

Les colonnes métriques, parfois appelées lysimètres, simulent, à échelle réduite et contrôlée, l'environnement pollué, du sol jusqu'à la nappe souterraine.

Ces dispositifs permettent d'étudier les échanges entre milieux, comme le transfert des polluants entre, par exemple, le système racinaire, le sol et la nappe phréatique. Les colonnes métriques sont moins facilement reproductibles que les colonnes 1D de laboratoire à cause du volume de matériaux plus important.

Les essais de vieillissement accéléré en cellules humides permettent d'altérer diverses matrices minérales (sédiments, terres excavées, résidus miniers et déchets divers, notamment scories de l'industrie métallurgique).

Ces essais normalisés (norme ASTM D 5744 – 96) sont couramment pratiqués dans l'industrie minière à des fins de détermination de la réactivité de certains matériaux.

Il s'agit d'une méthode d'altération cinétique, qui consiste à soumettre des échantillons solides à des périodes successives d'humidification et de séchage afin d'accélérer la vitesse d'altération naturelle et la formation de phases minérales secondaires.

Elle permet de collecter et d'analyser les lixiviats tout au long de l'expérience. Chaque cycle d'humidification-séchage dure 7 jours et se décompose en 3 étapes: (1) circulation d'air sec à travers l'échantillon pendant 3 jours, (2) circulation d'air humide (100%) pendant 3 jours, (3) saturation en eau pendant le 7^{ème} jour avant la collecte des lixiviats pour analyse.

Le protocole comprend 20 cycles, de sorte que la durée totale du test est de 4 mois.

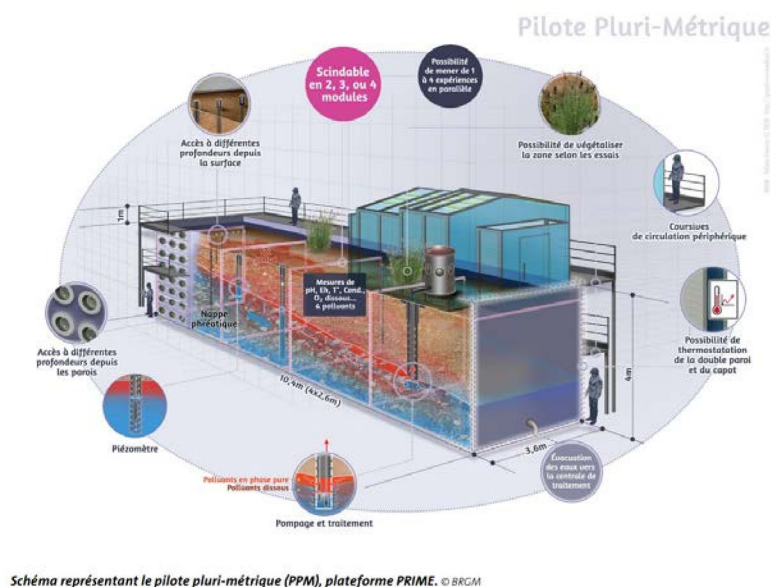


Schéma représentant le pilote pluri-métrique (PPM), plateforme PRIME. © BRGM

Figure 2 : Illustration du pilote plurimétrique et de ses différentes options. Ce dispositif est unique en Europe de par ses dimensions et ses équipements.

En revanche, elles permettent de reproduire plus fidèlement les phénomènes d'intérêts. Parfois, trois ou quatre colonnes métriques peuvent être utilisées dans le cadre d'un même projet.

L'intérêt de ce dispositif est décuplé lorsqu'il est associé, comme c'est le cas pour les lysimètres de la plateforme PRIME, à un automate.

Les prélèvements sont alors automatisés, ce qui permet d'économiser du temps de technicien et d'ingénieur et d'acquérir un très grand nombre de données.

Ces données servent ensuite à la mise

au point de modèles numériques utiles pour améliorer notre compréhension des phénomènes biogéochimiques et pour le prédimensionnement de procédés de dépollution

L'ECHELLE PLURIMÉTRIQUE, UNE ALTERNATIVE CREDIBLE AU SITE

Le Pilote pluri-métrique est un dispositif de 150 m³, doté d'une double paroi, et conçu pour reproduire en conditions réelles un site ou un sol pollué (Figure 2).

Grâce à sa modularité, il peut être divisé en plusieurs compartiments remplis de divers matériaux (eau, sable, sols pollués, sédiments, résidus miniers...) en fonction des besoins de l'étude. Cela permet de mener des expériences en parallèle et de tester des procédés de dépollution innovants.

La structure du pilote facilite l'installation de capteurs à différentes profondeurs, offrant ainsi des mesures précises et fiables.

Ce dispositif, unique en Europe par ses dimensions et ses équipements, est le moins reproductible des dispositifs de la plateforme PRIME, car une expérience nécessite à elle seule plusieurs mois voire un an de travaux en continu.

Tout en gardant des standards scientifiques élevés, notamment vis-à-vis des techniques d'instrumentation et de suivi utilisées, le pilote pluri-métrique s'écarte des expériences de laboratoire standard réalisées en tripliquat, pour rentrer pleinement dans le domaine de l'installation pilote.

Deux expériences sont en cours dans le pilote pluri-métrique. La première a pour but de tester la tomographie électrique du pilote afin de suivre l'infiltration d'une phase flottante à travers la zone non-saturée et sa mise en place sur le toit de la zone saturée (projet SPLODGE, partenariat BRGM/ ANTEA/ Région Centre-Val de Loire.).

Des simulations de battement de nappe et de pompage de la phase flottante ont ensuite été réalisées. La tomographie électrique a permis de distinguer les différentes phases de l'expérience en tout point du système grâce à la géophysique.

Cette expérimentation se poursuivra dans le cadre du projet MobilMousse avec Colas Environnement et EDF qui vise à améliorer la récupération de LNAPL à l'aide d'injection de liquides non newtoniens.

La seconde expérience a pour but de reproduire, dans le pilote, l'infiltration d'une solution d'émulseur contenant des composés per et polyfluoroalkylés (PFAS) et de suivre le transport de ces composés à travers la zone non saturée et saturée (projet Horizon H2020 PROMISCES).

La phase finale de l'expérience est en cours impliquant particulièrement Colas Environnement et l'IPGP, avec la dépollution du pilote à l'aide d'un lavage par un fluide complexe associé à deux procédés de destruction des PFAS.

En soutien à ces dispositifs multi-échelles, la plateforme dispose également d'une série d'équipements permettant la caractérisation des conditions expérimentales avec par exemple des appareils de chromatographies, des analyseurs permettant d'étudier la mouillabilité des solides, le pouvoir de diminution de la tension de surface des liquides de mousses ou encore la rhéologie des fluides.

CONCLUSION

Que ce soit dans le cadre de projets de R&D ou bien pour réaliser des essais suivant des normes bien précises, il est indispensable de pouvoir s'appuyer sur des dispositifs multi-échelles, car notre sujet d'étude, le sol et les transferts divers en son sein, sont par nature multi-échelle.

La plateforme PRIME, à travers les dispositifs présentés dans cet article, illustre ces différentes échelles d'application, avec un dégradé allant des expériences de laboratoire réalisées en tripliquat jusqu'à des expériences d'une durée de plusieurs mois dans des dispositifs à grande échelle.

Par cette présentation, nous souhaitons montrer que chaque type d'expérience doit répondre à une problématique bien précise, mais qu'elles ne doivent pas être mises en opposition.

Les expériences à petite échelle, bien que parfois peu représentatives du site, aident à comprendre les phénomènes et à se placer dans une approche "toute chose égale par ailleurs", qui peut être utile selon les objectifs.

De l'autre côté, les expériences à grande échelle, bien que comportant une part d'aléatoire importante, permettent également de mettre à l'épreuve des procédés innovants.

Depuis sa création, la plateforme PRIME a accueilli plus d'une quinzaine de projets de R&D et de projets collaboratifs avec des bureaux d'études, des sociétés de dépollution et des détenteurs de sites pollués.

Pour aller plus loin : Visite virtuelle et animation

[PRIME : un laboratoire d'essais novateur pour la dépollution des sols et des eaux | BRGM](#)

Clément ZORNIG (BRGM)
Maxime COCHENNEC (BRGM)
Stefan COLOMBANO (BRGM)
Dominique GUYONNET (BRGM)
Samuel COUSSY (BRGM)
Aline COFTIER (BRGM)

// DOSSIER : ESSAIS PILOTES & PLANS DE CONCEPTION DES TRAVAUX (PCT)

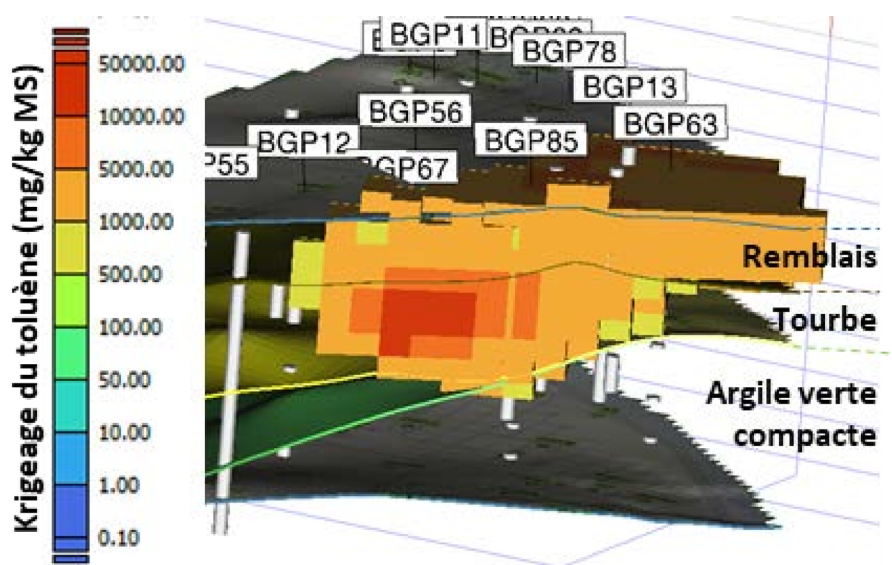
ESSAIS PILOTES ET PCT DANS LE CADRE DE TRAVAUX DE RÉHABILITATION

MENÉ PAR L'ADEME SUR UN ANCIEN SITE INDUSTRIEL DANS L'ESSONNE (91)

L'ADEME travaille sur la réhabilitation d'un ancien site industriel dont l'activité a cessé en 1992. Depuis 1997, des études ont été réalisées pour définir les pollutions présentes, les éventuels transferts entre les différents milieux et les modalités de gestion.

Depuis fin 2022, SARPI Remédiation et Ginger BURGEAP travaillent en groupement pour le compte de l'ADEME afin d'établir un PCT sur un site situé sur deux îles sur l'Essonne. L'essentiel de la pollution est concentré dans des tourbes à des teneurs importantes (> 50 g/kg en COHV et > 50 g/kg en BTEX) et plusieurs zones de pollutions concentrées de nature différente mais présentant de nombreux polluants (COHV, BTEX, HCT et PCB) sont présentes. L'aquifère en profondeur est impacté jusqu'à plusieurs centaines de mètres à l'aval sans que les zones de transfert en profondeur soient clairement localisées sur site. Ce contexte environnemental présente un véritable challenge pour la réhabilitation du site. Alors qu'un plan de gestion a été réalisé il y a plus d'une dizaine d'années, des études complémentaires se sont révélées nécessaires pour préparer les opérations de réhabilitation. Les études suivantes ont ainsi été menées successivement :

- Réalisation d'un diagnostic complémentaire en tenant compte de l'ensemble des données disponibles (30 ans d'études antérieures) ;
- Mise à jour des scénarii de réhabilitation ;
- Réalisation d'un ensemble d'essais de laboratoire et de terrain ;
- Mise à jour du plan de gestion et établissement d'un Plan de Conception de Travaux (PCT).



Visualisation d'une des zones de pollutions concentrées dans les sols (coupe verticale) : la pollution s'est accumulée au-dessus de la couche d'argile franche, la majorité est localisée dans les tourbes

SYNTHÈSE DES DONNÉES EXISTANTES

Les études environnementales réalisées depuis une trentaine d'années ont été rassemblées préalablement dans une base de données.

Toutes ces informations ont été valorisées pour réaliser un diagnostic complémentaire, la construction d'un modèle géologique et de la pollution en place en trois dimensions

ainsi qu'un bilan de masse par lithologie et par zone source.

La combinaison de ces modèles a permis d'améliorer la connaissance et la compréhension des transferts de pollution sur le site.

Ces résultats seront valorisés dans le cadre du PCT et du plan de gestion (réalisé de manière concomitante).

ESSAIS DE LABORATOIRE ET DE TERRAIN

Les essais sont menés avec un ensemble de tests de laboratoire et de terrain. Une partie des essais de terrain dépendant des essais de laboratoire, ces derniers sont réalisés dans un premier temps et, si les résultats s'avèrent concluants, les essais de terrain sont activés.

Ainsi, selon le cahier des charges de l'ADEME et en fonction des conclusions de la mise à jour des scénarii de réhabilitation, des échantillonnages complémentaires et des essais de laboratoire ont en premier lieu été réalisés par le laboratoire interne de SARPI Remédiation. Les mécanismes étudiés, les essais mis en œuvre et les conclusions sont synthétisés dans le tableau 1.

Mécanisme étudié	Etude / essai mis en oeuvre (B111)	Evaluation de la méthodologie	Autre essai recommandé
Pompage des eaux souterraines et étude du traitement des effluents	Essai laboratoire d'adsorption des polluants dissous sur média filtrant	Technique adaptée mais optimisation des taux de chargement à étudier	Mise en œuvre des essais de terrain avec différents dispositifs de traitement des eaux (stripping, filtres à charbon actif, séparateur avec bullage, filtre à sable, filtre avec média adapté aux métaux dissous)
	Caractérisation des eaux au laboratoire pour définir les risques liés au pompage (risques carbonates, "fer" et "soufre")	Risques possibles de précipitation de fer et de production d'H ₂ S	
Traitement hors site des zones sources sol par excavation, avec ou sans prétraitement des sols	Sondage à la tarière mécanique ou à la mini-pelle pour la réalisation d'analyse ISDI et composés complémentaires et une caractérisation des déchets enfouis	Matériaux orientables uniquement en filière d'incinération du fait de la présence de PCB en concentrations importantes, choix des centres de traitement très restreint	Réaliser un essai d'élimination hors site des matériaux pour : • Etudier le comportement des matériaux lors du terrassement et du transport (tourbes), • Obtenir un certificat préalable d'acceptation des déchets
	Essai de volatilisation mécanique en laboratoire avec ajout de chaux	Bon abattement des polluants volatils mais quantité de chaux nécessaire très importante	Même après un pré-traitement permettant d'abaisser les concentrations en composés volatils, les matériaux ne pourront être acceptés en ISDD ou DT (problématique PCB)
Traitement in situ par réduction chimique	Essai de réduction chimique en laboratoire par ajout de fer zéro	Bon fonctionnement mais uniquement sur une partie du site	Réaliser un essai de terrain d'injection de traceur, sur la zone favorable
Traitement in situ par oxydation chimique	Essai d'oxydation chimique en laboratoire: Etude de la DSO et du mécanisme d'oxydation par ajout de persulfate et de permanganate	Action sur quelques composés mais avec de fortes concentrations en oxydant (milieu très réducteur)	
Traitement in situ par biodégradation aérobie	Essai de biostimulation aérobie en laboratoire avec apport d'azote et d'oxygène (persulfate)	Voie nitratre peu ou non activée	
	Analyse microbiologique (laboratoire externe)	Présence de bactéries et développement mais en quantité insuffisante	
Traitement in situ par biodégradation anaérobie	Essai de biostimulation anaérobie en laboratoire par ajout d'une source de carbone ou de sulfate et de nitrate (sulfato-réduction)	Action limitée à quelques composés non majoritaires	
	Analyse microbiologique (laboratoire externe)	Présence de bactéries mais pas d'évolution suite à la stimulation du milieu	

Tableau 1 : Synthèse des essais laboratoire et études - Etape 1

À la suite de ces premières conclusions, les essais de terrain suivants ont été ou seront à réaliser dans un second temps. (Tableau 2)

Les différents essais sont menés pas à pas afin d'étudier un panel suffisant de méthodologies de réhabilitation.

En effet, les contraintes du site sont nombreuses, à la fois via son environnement et via les pollutions présentes dans les différents milieux.

Les orientations des essais sont donc revues régulièrement pour s'adapter au mieux au site et aux enjeux de sa réhabilitation.

MISE À JOUR DU PLAN DE GESTION ET RÉALISATION DU PLAN DE CONCEPTION DES TRAVAUX PCT (B120)

L'ensemble des études décrites dans les paragraphes précédents permettra dans un premier temps de mettre à jour le Plan de Gestion déjà réalisé en 2011.

Mécanisme étudié	Etude / essai mis en oeuvre (B112)	Evaluation de la méthodologie
Pompage des eaux souterraines	Essai de pompage sur deux zones définies : caractérisation des paramètres hydrodynamiques de la nappe	Pompage possible malgré un milieu hétérogène
	Filtration des eaux avec deux lignes de traitement distinctes pour chaque zone en fonction des polluants, afin d'étudier : • les taux d'abattement en polluants • les taux de chargement des médias filtrants • les conformités des rejets	Bon abattement des composés rencontrés et bon taux de chargement des médias filtrants Rejets conformes Remarque : Risque H2S confirmé par les essais, recommandation de la mise en place d'une filtration adaptée
Extraction multi-phase (EMP)	Essai d'EMP planifié en février/mars 2025	
Traitement in situ par réduction chimique	Essai d'injection de traceur pour évaluer la capacité d'absorption du milieu planifié en mars 2025	
Traitement hors site des zones sources sol par excavation	Etude géotechnique à planifier en 2025	
	Essai d'excavation et élimination hors site à planifier en 2025	

Tableau 2 : Synthèse des essais de terrain - Etape 2

Focus sur l'atténuation naturelle

L'atténuation naturelle contrôlée est l'une des solutions de gestion envisagées sur le site. Ont été réalisés des analyses chimiques sur les accepteurs d'électrons et les produits de dégradation, des analyses isotopiques et des analyses de biologie moléculaire. Ces investigations mettent en évidence que la biodégradation des COHV et BTEX est active sur certaines zones du site (présence de produits de dégradation, ratio isotopique modifié et activité des biomarqueurs spécifiques). Les conditions dans lesquelles elle opère et son efficacité restent cependant difficiles à appréhender. La dégradation naturelle de la matière organique dans les tourbes est également très présente (forte teneur en méthane, activité bactérienne générale importante). La dégradation des COHV est plus ou moins avancée selon les secteurs et la biodégradation du benzène n'est pas mise en évidence sur toutes les zones de pollution. L'analyse des ratios isotopiques, en particulier, donne des éléments de réponse quant aux questionnements sur le transfert de pollution en profondeur et l'origine de cet impact (contribution de l'une ou l'autre des sources de pollution). L'étude de l'atténuation naturelle conduit à confirmer que l'atténuation naturelle contrôlée pourrait être une solution pour certaines zones de pollution.

Le groupement produira ensuite un Plan de Conception de Travaux qui permettra de définir les modalités de réhabilitation du site selon la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués, en tenant compte de son environnement et des contraintes qui y sont liées.

CONCLUSION

Pour conclure, suite aux nombreuses études menées sur site, l'ADEME souhaite définir les modalités de gestion du site par l'établissement d'un PCT.

Dans cette démarche, le groupement SARPI Remédiation et Ginger BURGEAP met en œuvre un ensemble d'études complémentaires pour caractériser au mieux les pollutions présentes et évaluer l'ensemble des méthodologies de réhabilitation pouvant s'appliquer au site en tenant compte de ses complexités et contraintes.

A l'issue de ces travaux, le groupement établira une stratégie de dépollution à travers un Plan de Gestion et un PCT réalisés en même temps.

Amélie RICAUD (SARPI Remédiation)
Juliette CHASTANET (Ginger BURGEAP)

// DOSSIER : ESSAIS PILOTES & PLANS DE CONCEPTION DES TRAVAUX (PCT)

BIEN EXPLOITER LES RÉSULTATS DES ESSAIS LABORATOIRE ET PILOTES TERRAIN

Les essais laboratoires et pilotes terrain sont aujourd'hui une étape quasi incontournable pour valider les stratégies de dépollution et bien dimensionner les chantiers. ORTEC SOLEO, en tant qu'entreprise de travaux de dépollution, utilise cet outil de conception depuis toujours. Les prestations sont réalisées aussi bien en interne pour sécuriser et optimiser nos opérations, qu'en externe pour nos clients dans le cadre de leurs plans de gestion, PCT ou projets de R&D. Encore faut-il bien exploiter ces résultats !

L'IMPORTANCE DE RÉALISER CES ESSAIS

Comme de nombreux acteurs de la profession, ORTEC SOLEO réalise des tests en laboratoires et des essais pilotes sur le terrain depuis sa création, afin de valider les stratégies de dépollution qu'elle propose et bien les dimensionner.

Le métier a évolué, les clients se rendant compte de l'importance de ces étapes de conception qui, pour un coût limité, permettent de sécuriser les travaux pleine échelle et souvent de réaliser des économies substantielles.

Au-delà du cadre réglementaire favorable (Norme NF X 31-620, codifications B111, B112, PCT...), les essais en laboratoire et les pilotes sur le terrain sont donc un vrai plus pour toutes les parties.

UNE VISION TRAVAUX PRIMORDIALE

La réalisation des essais en laboratoire ou sur le terrain nécessite en amont d'avoir cette vision globale des travaux à réaliser.

Que les sociétés qui réalisent les essais soient des entreprises de travaux, des bureaux d'études, ou des laboratoires indépendants, c'est cette expertise qui permet d'élaborer correctement une stratégie de dépollution.



Essais pilotes terrain de réduction chimique par soil mixing avec injection de fer zéro valent et de biodégradation anaérobie

Parfois, les essais ne sont tout simplement pas nécessaires. Lorsqu'ils sont pertinents, il faut proposer des essais adaptés, pour que les résultats permettent de valider la stratégie et de dimensionner le traitement global.

Le retour d'expérience du terrain est primordial pour pouvoir proposer les essais

adéquats (par exemple le type de réactifs, la gamme de concentrations testée, la méthode d'injection etc...).

Seuls des essais pertinents et bien réalisés pourront être bien interprétés !

DU GO/NO GO AU DIMENSIONNEMENT DES TRAVAUX

L'interprétation peut aller du NO GO, parce que la technique testée ne fonctionne pas, (et c'est un résultat en soi !) jusqu'au dimensionnement des travaux pleine échelle si la méthode de traitement est adaptée.

L'exploitation rigoureuse, scientifique et transparente des données ainsi acquises est primordiale pour la conception pleine échelle et la réussite des chantiers qui en découlent.

Dans ce contexte, les éventuels résultats défavorables de tests et essais sont précieux et à considérer avec la plus grande attention, car ils peuvent éviter de se lancer dans des opérations vouées à l'échec.

Ils nécessitent en revanche de communiquer les résultats avec pédagogie auprès des maitres d'ouvrages et/ou de l'administration.

Dire non peut parfois être le meilleur conseil que nous pouvons donner à nos clients !

La conclusion peut également être que des essais complémentaires sont nécessaires, par exemple sur le terrain pour bien dimensionner les modalités de mise en œuvre par rapport au contexte local, sur une durée plus longue pour bien valider les flux de récupération massique d'un venting ou laisser du temps aux mécanismes de biodégradation.

Par exemple, lorsque des essais de désorption thermique sont réalisés en laboratoire, il s'agit certes de valider si le chauffage à une température donnée permet de volatiliser les polluants présents et d'obtenir un taux prévisionnel d'abattement dans les sols.

Mais il s'agit également de recueillir des données dimensionnantes et toute information pertinente, qui permettront de réaliser correctement le traitement pleine échelle, du chauffage, jusqu'au traitement des gaz.

Nous avons réalisé une série d'essais en laboratoire et sur le terrain, portant sur une problématique HAP et notamment naphtalène dans les sols. Les essais de désorption thermique en colonne au laboratoire ont révélé un problème technique : le naphtalène, fortement concentré, cristallisait dans les tuyaux d'extraction des gaz du sol au niveau du circuit de condensation.

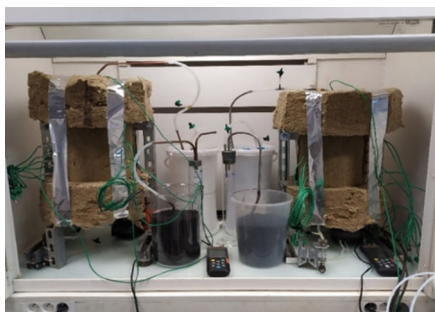


Essai laboratoire de réduction chimique

La détection de ce phénomène dès le stade des essais en laboratoire a permis d'adapter le pilote de terrain de désorption thermique in situ qui a suivi, en mettant en place un système de chauffage et de calorifugeage des tuyauteries de l'unité de traitement, et d'adapter le système de récupération de la phase pure.

Le volume d'effluent, le volume de phase pure récupérable, et les modalités de traitement des gaz du traitement pleine échelle ont donc pu être dimensionnés.

Grâce à ces informations, le coût prévisionnel du traitement global a pu être réajusté, les engagements ont été sécurisés et le chantier a été réalisé dans des conditions maîtrisées.

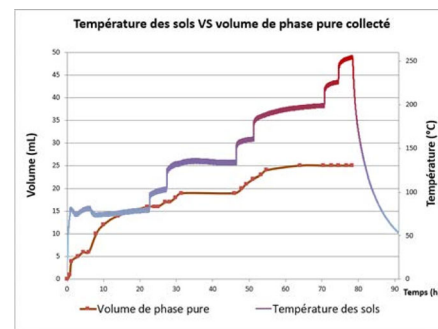


Essais laboratoires de désorption thermique

REMETTRE EN QUESTION UNE STRATÉGIE

Les tests en laboratoires et les essais pilotes permettent de dimensionner les solutions de traitement, mais également de vérifier leur faisabilité, c'est-à-dire que les objectifs fixés sont compatibles avec la capacité de la solution mise en œuvre.

Il est donc important de confronter les résultats des tests et essais avec les objectifs envisagés. Le cas échéant, il ne faut pas hésiter à remettre en cause la solution envisagée ou, si la technique envisagée est la meilleure technique disponible, à revoir les objectifs pour les mettre en concordance avec la faisabilité.





Essai pilote terrain de désorption thermique

Dans ce dernier cas, la notion d'obligation de moyens et d'atteinte des limites techniques (asymptote de concentration ou de bilan de masse) peuvent être retenues.

Voici deux exemples pour illustrer.

Pour des terres impactées par des solvants chlorés, la solution préconisée était un criblage/chaulage, solution à priori adaptée, pour atteindre un objectif en somme des COHV inférieur à 5 mg/kg MS.

Pourtant, les tests en laboratoire de volatilisation réalisés ont démontré que, quels que soient les conditions testées et les niveaux de contamination initiale, la concentration de 5 mg/kg ne pouvait être atteinte.

Dans le cas présent deux solutions auraient dû être envisagées : soit changer de technique, soit prendre en considération les résultats des tests qui démontreraient qu'en dessous d'une certaine concentration le polluant est séquestré et peu mobile. Ce résultat qui aurait pu être utilisé pour reconsidérer le calcul ayant abouti à la définition de l'objectif.

Pour une nappe impactée par des solvants chlorés en forte concentration, il était envisagé une oxydation chimique in-situ, solution également à priori adaptée.

Pourtant, des tests laboratoire de demande du sol en oxydant laissaient à penser que des quantités très importantes de réactifs allaient être nécessaires, ce qui, au-delà des considérations techniques, induit un enjeu financier important qui peut remettre en cause le projet.

Un pilote terrain d'injection a été néanmoins mené et a conclu à la faisabilité de la solution, mais sans tenir compte des signes d'effets rebonds qui auraient dû alarmer sur les difficultés d'atteindre les résultats dans le délai et le budget annoncé au client.

Ainsi ces deux exemples mettent bien en évidence l'intérêt d'analyser, avec précision et rigueur scientifique, les résultats de tests et essais et d'accepter les résultats tels qu'ils sont.

La communication avec le client et/ou l'administration nécessite alors transparence et pédagogie. Un test laboratoire ou un pilote terrain qui démontre une non-faisabilité n'est pas un échec, il est même plus précieux qu'un test favorable, puisqu'il évite de se lancer dans une opération vouée à l'échec qui aurait d'importantes répercussions techniques, économiques, temporelles et contractuelles.

Notre devoir de conseil implique donc également de savoir dire non au client et orienter la stratégie de manière pragmatique.

LA TRANSPARENCE EST LA CLÉ

Les rapports d'essai doivent fournir des données dimensionnantes : des concentrations efficaces de réactif (g/kg de sol), des perméabilités, des rayons d'action associés à des débits et des pressions, des cinétiques démontrant la faisabilité des objectifs etc...

Ces données, ainsi que des protocoles d'essai sont nécessaires pour bien interpréter les résultats et pour bien dimensionner les travaux.

Ainsi, pour dimensionner une oxydation chimique, la demande du sol en oxydant doit être clairement communiquée et non pas seulement des abattements.

La DSO est un paramètre clé. Il est impossible de dimensionner correctement une réduction chimique lorsque la quantité de réactif apportée figure en g/l, sans connaître la quantité de sol dans les flacons.

Le dosage doit être clairement communiqué en g de réactif apporté par kg de sol. Si on prend l'exemple du venting, les données exploitables attendues pour un dimensionnement correct des travaux sont le débit critique, le débit optimal, le rayon d'influence et le rayon d'action.

Le guide ESTRAPOL (ADEME, 2019) reprend les détails de contenu des essais en laboratoire et sur le terrain pour les principales techniques de dépollution, avec pour objectif principal de contribuer à sécuriser le choix des techniques de dépollution préconisées.

DES RÉSULTATS DIMENSIONNANTS... ET ENGAGEANTS

Au-delà d'aider au dimensionnement et à la validation des solutions techniques, les résultats des essais vont également intervenir dans la définition des engagements que va demander le client et que va proposer l'entreprise de travaux.

La société qui réalise les essais porte donc une responsabilité importante vis-à-vis des travaux qui vont être mis en œuvre et des engagements pris.

Cette responsabilité est également forte pour la société qui élabore le PCT, celui-ci définissant le choix de la solution à mettre en œuvre et le dimensionnement des travaux pleine échelle.

Il est à noter que lorsque les essais ont été réalisés dans les règles de l'art et que la meilleure technique disponible (MTD) a été mise en œuvre avec un dimensionnement conforme aux données acquises, les objectifs ne peuvent techniquement pas aller au-delà de la limite technique démontrée par les essais.

Carole MARCON (ORTEC-SOLEO)
Christophe CHÈNE (ORTEC-SOLEO)

// DOSSIER : ESSAIS PILOTES & PLANS DE CONCEPTION DES TRAVAUX (PCT)

LES BIOINDICATEURS AU SERVICE DES SITES ET SOLS POLLUES

Les bioindicateurs renseignent sur la qualité des sols et leurs fonctions, permettant ainsi une approche intégratrice de la pollution encore peu utilisée.

Dans le domaine des sites et sols pollués, il est usuel d'identifier et de quantifier les polluants dans les différents milieux récepteurs.

Dans le sol, c'est la teneur totale qui est classiquement mesurée : elle intègre les fractions peu ou pas disponibles (polluant lié au sol) pour les organismes et la fraction labile ou biodisponible qui va pouvoir être transférée vers le biote.

La teneur totale ne permet donc pas d'estimer réellement les transferts et impacts d'une pollution car elle surévalue, la plupart du temps, l'exposition et le risque en intégrant la partie de la pollution non accessible aux organismes vivants.

Pour améliorer l'évaluation des expositions et des risques lors du diagnostic, d'essais pilotes ou dans le cadre d'un PCT, les mesures de teneurs totales doivent donc être complétées par des analyses de la biodisponibilité environnementale (fraction assimilable par le vivant et susceptible d'engendrer des effets délétères).

Ces deux fractions renseignent sur le comportement du polluant dans le sol et les potentiels transferts vers les autres milieux récepteurs (eau, gaz du sol, végétaux).

Parmi les outils disponibles et matures, il existe quelques bioindicateurs d'accumulation permettant de mesurer la quantité de polluant réellement assimilée par des organismes vivants exposés aux sols pollués, que l'exposition ait lieu sur le terrain ou au laboratoire, et qui disposent de valeurs de références pour interpréter les résultats.

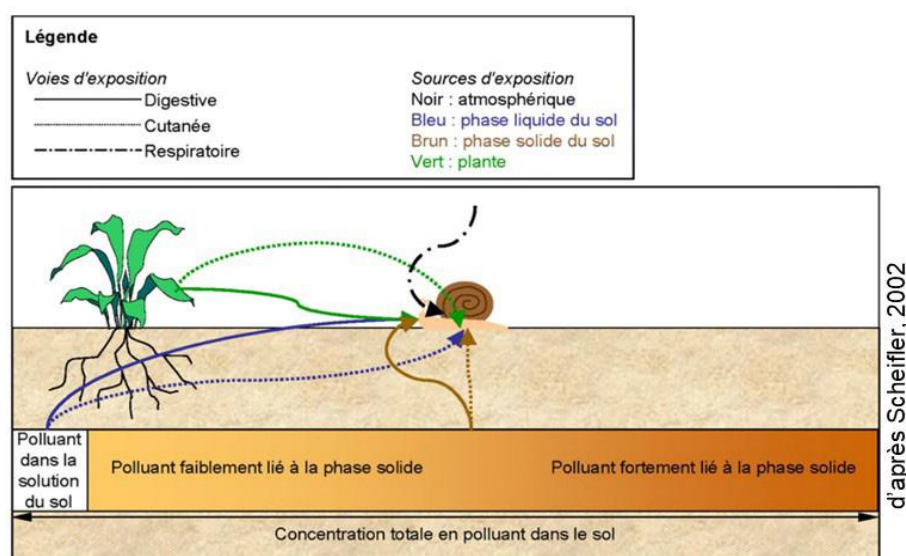


Figure 1. L'exposition d'escargots sur le site d'étude permet d'estimer les transferts de polluant vers les premiers maillons d'une chaîne trophique.

L'APPORT DE LA BIODISPONIBILITE ENVIRONNEMENTALE DANS UNE ETUDE SSP

Bien que rarement recherchée dans les sols, la mesure de la biodisponibilité environnementale via différents outils permet d'estimer l'exposition des organismes vivants aux polluants du sol et les risques liés à la pollution à toutes les étapes de gestion d'un site pollué.

Lors d'essais pilotes ou d'un PCT, les données obtenues apportent des leviers décisionnels permettant d'appréhender de manière plus réaliste les transferts des polluants du sol vers les matrices environnementales (sol, sédiments, eaux, végétation) et des compléments pour

confirmer, adapter ou orienter le choix des mesures de gestion des pollutions à mettre en œuvre sur le site.

Ces mesures peuvent, notamment, évaluer si les solutions de gestion proposées permettent de réduire les transferts de polluants, l'exposition et de diminuer le risque.

L'analyse de la biodisponibilité environnementale est possible sur plusieurs types de polluants, même s'il existe plus d'outils pour les polluants inorganiques que pour les polluants organiques. Elle peut être quantifiée à l'aide de différents bioindicateurs d'accumulation.

L'INDICE SET

L'indice SET pour "Somme des Excès de Transferts" est un outil permettant d'estimer la biodisponibilité des polluants à l'aide d'un modèle animal herbivore : l'escargot.

La méthode est basée sur l'exposition à un milieu pollué (végétaux, sols) des escargots sur site ou au laboratoire (Figure 1).

À l'issue de l'exposition, une analyse permet de mesurer la concentration médiane en polluants bioaccumulés dans les viscères des animaux après 28 jours d'exposition. Le quotient d'accumulation (QA) est alors calculé et intègre les excès de transfert des polluants du milieu d'exposition dans les escargots par rapport à des valeurs de références (Threshold Guide Value, ou TGV) correspondant aux valeurs fréquentes dans les viscères d'escargots non exposés à une pollution.

Un QA supérieur à 1 caractérise un excès de transfert par rapport à un sol non pollué pour le polluant considéré. L'indice SET qui intègre alors l'ensemble des QA de chaque polluant renseigne ainsi sur l'exposition de consommateurs de niveaux supérieurs (exposition directe au sol pollué et exposition via l'alimentation) et contribue à l'estimation du risque.

L'interprétation des concentrations mesurées dans les viscères est possible pour les éléments métalliques pour lesquels une valeur de référence a été déterminée sur des sols non pollués d'usages très différents comme des sols de prairie, de culture ou de forêt.

Bien que le retour d'expérience soit plus important pour les contaminants inorganiques, il existe également des TGV pour les 16 HAP et 7 PCB les plus courants.

L'INDICE PHYTOAC

L'indice PhytoAc renseigne sur la concentration en polluants dans la végétation (phytodisponibilité) d'un site pollué en excès par rapport aux teneurs habituelles rencontrées dans la végétation d'un sol non pollué.

Cet indice est basé sur l'analyse de feuilles (échantillon foliaire) prélevées sur un ensemble d'espèces caractéristiques de la communauté végétale du site.

Chaque échantillon est constitué de feuilles prélevées sur les trois à cinq espèces les plus abondantes au point de prélèvement.

L'indice PhytoAc donne une image représentative des transferts de polluants à l'échelle de la végétation du site prise dans son ensemble (Figure 2).

Il est basé sur la comparaison des distributions des teneurs foliaires en polluant dans les échantillons du site étudié, avec celles mesurées dans des échantillons de référence.

Comme pour l'indice SET escargot, il intègre

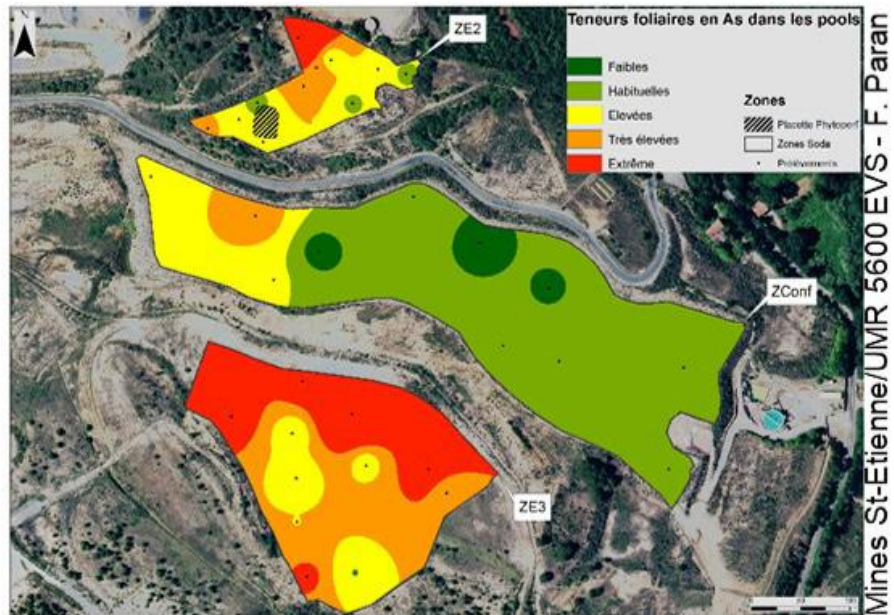


Figure 2. Exemple de cartographie de la phytodisponibilité de l'arsenic sur un site d'étude.

en sommant les excès de concentration foliaire de chaque élément.

La détermination de l'indice PhytoAc peut être envisagée pour tous les éléments traces métalliques, à condition de disposer de données de référence (valeurs habituelles sur des sols non pollués).

À l'heure actuelle, des valeurs de référence sont disponibles pour l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le nickel (Ni), le plomb (Pb) et le zinc (Zn). L'indice n'est pas adapté aux polluants organiques tels que les hydrocarbures, pour lesquels l'accumulation, le métabolisme et les produits de dégradation sont mal connus chez les végétaux.

Retour d'expérience L'indice SET pour évaluer les risques liés à la phytostabilisation lors d'essais pilotes

L'indice SET a été mesuré lors d'essais pilotes de phytostabilisation sur un ancien site minier géré par le BRGM pour mieux évaluer les transferts résiduels et les risques associés.

Les essais pilotes de phytostabilisation ont été réalisés dans l'objectif de limiter l'érosion intense de résidus miniers quasiment dépourvus de végétation et contenant des teneurs significatives en arsenic.

Selon le protocole SET, 15 escargots ont été installés dans des microcosmes pendant 28 jours sur chacune des 2 parcelles d'essais de sorte à évaluer les transferts résiduels d'arsenic vers les chaînes trophiques (Figure 3).

Les résultats ont montré un excès de transfert principalement pour l'arsenic sur les 2 parcelles (accumulation environ 4 à 5 fois supérieures à la valeur de référence (TGV)).

Néanmoins, l'interprétation des indices SET pour 14 métaux et métalloïdes permet de conclure à une absence de risques pour les escargots et par extension dans la chaîne trophique simplifiée étudiée.



Figure 3. Parcelle pilote de phytostabilisation étudiée (gauche), et exemple de mise en place d'escargots dans un mésocosme (droite).

Retour d'expérience L'indice SET pour évaluer les risques liés à la phytoextraction lors d'essais pilotes

L'indice SET a été utilisé pour évaluer les risques de transferts des polluants dans un contexte de phytoextraction sur un site urbain géré par l'INERIS (Grignet et al. 2020).

Encagés en microcosmes sur le site pollué, les escargots exposés au sol et aux feuilles de l'hyperaccumulateur de Cd et de Zn pendant 28 jours (*Arabidopsis halleri*, Figure 4) ont montré dans leurs viscères des concentrations en Pb et en Zn très supérieures à celles obtenues en présence de terreau ou de feuilles moins enrichies (Hyperaccumulateur, Table 1).

Ces résultats montrent la biodisponibilité de ces éléments dans le sol et dans la plante pour l'escargot et indiquent un potentiel risque de transfert dans la chaîne trophique simplifiée étudiée.

Dans les conditions naturelles, les transferts pourraient être néanmoins réduits, la diversité de nourriture étant plus importante. De plus, il a été observé que les feuilles plus âgées sont moins consommées que les feuilles jeunes, du fait de leur enrichissement en métaux.

Ces résultats mettent en évidence un risque de dispersion des métaux dans la chaîne trophique étudiée avec cet hyperaccumulateur. Une étude du même type sur des feuilles de saules (accumulateur de Cd et de Zn) a montré que, dans ce cas, le risque de dispersion était faible mais non négligeable.

Modalités		mg métal / kg de masse sèche			Quotient d'accumulation (QA)			SET
		Cd	Pb	Zn	Cd	Pb	Zn	
Hyperaccumulateur	Viscères d'escargot	11,63 ± 3,45	1,32 ± 0,30	1446 ± 420	5,12	1	1	4,12
	Plante	9,69	< 0,5	895				
Site	Viscères d'escargot	10,19 ± 3,37	16,40 ± 6,36	6327 ± 2357	4,49	1,27	4,25	7,01
	Plante	8,12	2,11	5802				
Valeurs de référence		2,27	12,9	1490				

Table 1. Concentrations en Cd, Pb et Zn dans les viscères des escargots après 28 jours d'exposition au sol et aux plantes sur site et en chambre de culture en microcosmes (Hyperaccumulateur), quotients d'accumulation et indice SET calculés correspondants.



Figure 4. Escargots exposés au sol en cages en microcosmes sur le site pollué (à droite) et aux feuilles de l'hyperaccumulateur de Cd et de Zn (à gauche).

Retour d'expérience L'indice PhytoAc pour une meilleure évaluation des risques liés au transfert de métaux

L'indice PhytoAc a été utilisé sur un site de 28 hectares pour évaluer les transferts de métaux et métalloïdes dans un contexte d'évaluation des risques environnementaux (Figure 5).

Sur une ancienne zone péri-urbaine polluée par différentes substances, l'indice PhytoAc est ici utilisé pour évaluer les transferts de polluants vers les communautés de végétaux.

L'utilisation de cet indice a notamment permis de mettre en évidence des zones avec différents niveaux de transferts en excès, avec des valeurs entre 0 et 1 (Figure 5).

Cette étude de transfert a par la suite été intégrée dans un démarche TRIADE, une approche multi-lignes de preuve (Lines of Evidence, LoE), permettant d'évaluer les risques écologiques du site en combinant les différentes dimensions : chimique, biologique et éco toxicologique.

Ces données de transferts des polluants vers la végétation peuvent par la suite alimenter le schéma conceptuel du site, permettant une meilleure orientation des usages futurs du site et/ou des méthodes de gestion à mettre en place.



Figure 5. Parcelles avec excès de transfert mises en évidence sur le site étudié

CONCLUSION

En conduisant à une meilleure caractérisation des milieux et des risques dans le cadre d'essais pilotes ou du PCT lors de l'usage de solutions fondées sur la nature, la mesure de la biodisponibilité environnementale est un atout indéniable pour conforter le choix de la méthode de gestion d'un site.

Pour estimer la biodisponibilité d'un polluant sur un site, il est recommandé de privilégier des valeurs mesurées dans les milieux d'exposition et dans les matrices

biologiques prélevées directement sur le site d'étude plutôt que de recourir à des valeurs bibliographiques.

Il est important de mettre en œuvre différents essais (batterie de tests) pour obtenir un résultat représentatif des différents types d'organismes du site (végétaux, invertébrés, ...).

Les résultats de ces essais peuvent permettre notamment d'alimenter l'évaluation des expositions et des risques pour les écosystèmes lors d'études intégratives, comme l'approche TRIADE.

Les bioindicateurs cités ainsi que le concept de biodisponibilité disposent de fiches techniques innovantes qui expliquent leur principe en détail et fournissent des éléments de méthodologie, les avantages et inconvénients, la maturité et des coûts.

Ces fiches techniques innovantes sont disponibles sur <https://ssp-infoterre.brgm.fr/fr/guide/fiches-ssp-techniques-innovantes> et encouragent l'ensemble des acteurs à les mettre en pratique. Que vous soyez maître d'ouvrage, maître d'œuvre ou bureaux d'études, n'hésitez pas à les essayer !

// DOSSIER : ESSAIS PILOTES & PLANS DE CONCEPTION DES TRAVAUX (PCT)

PLAN DE CONCEPTION DE TRAVAUX MULTI-TECHNIQUES

ETABLI AVEC LES CONTRAINTES D'UN PROJET D'AMENAGEMENT

La dépollution des sols doit par moment se frayer un chemin entre les différentes étapes du projet d'aménagement, et s'adapter à diverses contraintes tels que les délais, une emprise limitée, une forte coactivité ou encore des zones déjà aménagées. C'est dans ce contexte que des essais pilotes multi-techniques in situ ont été réalisés pour le traitement d'anomalies résiduelles en hydrocarbures volatils dans les sols dans un délai contraint de 6 mois.

CONTEXTE ET OBJECTIF

Dans le cadre d'un projet d'aménagement de type tertiaire avec un niveau de sous-sol, et du fait de la présence de teneurs résiduelles dans les milieux après plusieurs phases de réhabilitation d'un ancien site industriel, un plan de gestion (PG) visant à définir les modalités de gestion a été réalisé par ICF (marque d'Antea Group pour les prestations d'ingénierie en Ile-de-France) en collaboration avec SERPOL.

L'orientation retenue lors du plan de gestion à l'issue du bilan coûts-avantages était un traitement par oxydation chimique par injection, complété par un venting.

Afin de valider et sécuriser le scénario de gestion retenu au stade du PG, SERPOL a réalisé une caractérisation complémentaire des sols et mené différents essais pilotes pour ensuite dimensionner les solutions de réhabilitation possibles selon les contraintes du projet (figure 1).

CARACTERISATION COMPLEMENTAIRE DES ANOMALIES RESIDUELLES

Des investigations complémentaires des zones d'anomalies résiduelles identifiées dans le PG ont été réalisées par le biais de 43 sondages entre 6 et 13,5 m de profondeur avec le prélèvement de 218 échantillons de sols sur deux zones distinctes du site.

Cette caractérisation a permis de délimiter les mailles impactées à partir de 9 m de profondeur, en cohérence avec les opérations de réhabilitation effectuées auparavant, ainsi que d'estimer la masse résiduelle de polluants au droit de ces mailles pour le dimensionnement du traitement.

Ce diagnostic a permis d'actualiser les volumes de sols à traiter à 2 000 m³, la masse d'hydrocarbures totaux résiduelle à 23 tonnes, et l'emprise des zones à traiter, avec la majorité des anomalies résiduelles localisées dans les horizons saturés et moins perméables que les zones déjà traitées.

S'ADAPTER AUX CONTRAINTES DU PROJET

Dans les projets de réhabilitation, il est indispensable d'adapter les solutions de traitement aux impératifs du projet, à savoir, pour notre cas :

- Des délais de mise en œuvre contraints avant le démarrage des travaux d'aménagement (6 mois) ;
- Une emprise restreinte, avec nécessité de libération ponctuelle de zone, au cœur de différentes phases de travaux et de circulation des entreprises engendrant une forte coactivité ;
- Des zones déjà aménagées avec une densité importante de réseaux enterrés.



Figure 1 : Essais sur site en partenariat Serpol & Antea Group

Compte tenu de ces contraintes, le PCT a intégré plusieurs typologies d'essais nécessaires au dimensionnement de la solution de traitement, pour valider sa faisabilité technique d'une part et estimer leur efficacité dans le délai imparti de 6 mois d'autre part.

A noter que les différents essais n'ont pu être menés qu'au droit d'une seule et même

zone, compte tenu de l'aménagement des réseaux en cours sur la seconde partie de la surface concernée.

Les résultats ont donc été étendus à l'emprise globale en prenant en compte les hétérogénéités des sols rencontrées lors des investigations complémentaires.

CONTENU DES ESSAIS MULTI-TECHNIQUES

ESSAIS LABORATOIRES

Préalablement aux essais terrains, afin d'évaluer la quantité d'oxydant consommée naturellement par le sol (hors contaminants organiques), la mesure de la Demande du Sol en Oxydant (DSO) a été réalisée au laboratoire interne SERPOL à partir des prélèvements de sol réalisés dans le cadre des investigations complémentaires (figure 2).

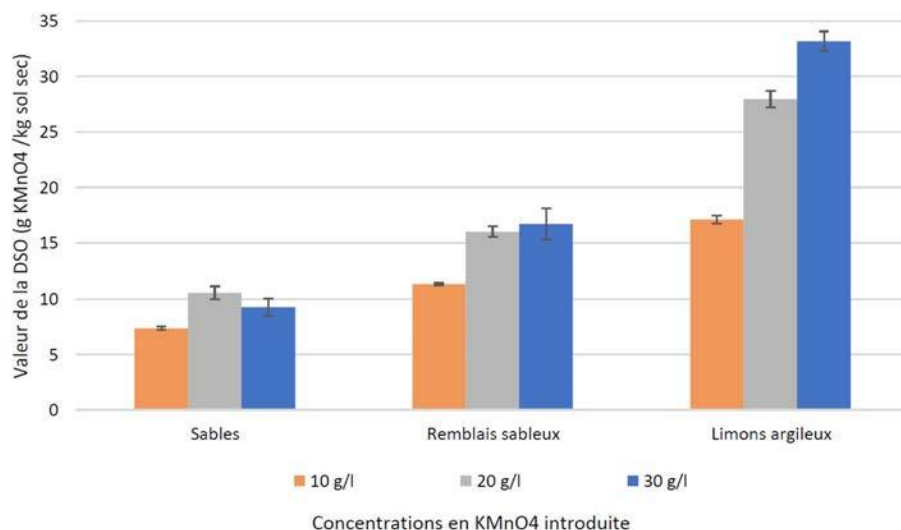


Figure 2 : Résultats des calculs de DSO des trois échantillons de sol

d'atteindre un abattement maximum de 21 %.

Le traitement par venting seul n'apparaissant pas suffisant pour améliorer de manière significative la qualité des milieux dans le délai imparti, des essais complémentaires de sparging ont été mis en œuvre afin d'optimiser le rendement d'extraction au niveau de la zone de battement de nappe.

De manière analogue au traitement par venting seul, des hétérogénéités locales impactant à la fois le rayon d'action et le débit d'extraction ont été observées. Le traitement par sparging et venting a permis de noter une hausse des masses extraites en comparaison au venting seul.

ESSAIS D'INJECTION IN-SITU

Plusieurs modalités d'injection d'oxydant sont possibles sur terrain. Ainsi, des essais pilotes d'oxydation chimique in-situ par injection gravitaire et sous pression en nappe ont été réalisés.

Toutefois, les observations de terrain et les analyses de la qualité des eaux souterraines ont confirmé les faibles rayons d'influence autour de l'ouvrage.

Compte tenu des résultats précédents, la technologie d'injection SPIN®, développée par INJECTIS a été proposée pour réaliser des injections directes à basse pression directement dans les sols, malgré leurs faibles perméabilités. Durant l'injection, des sondes intégrées à la machine permettent de suivre le volume injecté, la pression et le débit d'injection, ainsi qu'une valeur relative de perméabilité pour la conductivité hydraulique des différentes couches de sols traversées (figure 3).

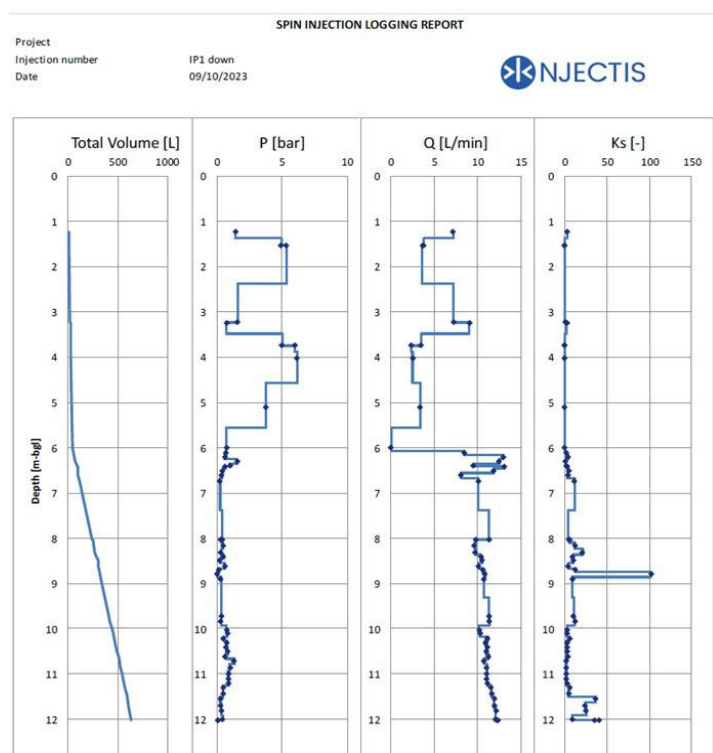


Figure 3 : Monitoring des injections

L'objectif de l'essai fut également de définir le dosage optimal des réactifs.

Ces essais laboratoires ont ainsi permis de valider la faisabilité d'une oxydation chimique à l'aide du réactif de Fenton (peroxyde d'hydrogène, acide citrique et sulfate de fer) pour une meilleure efficacité sur les hydrocarbures volatils résiduels.

ESSAIS DE VENTING PUIS DE SPARGING

Un essai pilote de venting a été mis en œuvre par le biais de 4 aiguilles d'extraction à 9 m

de profondeur et un réseau d'ouvrages de surveillance existants, distants de 2 à 13 m des ouvrages d'extraction.

Ces essais ont mis en évidence de fortes hétérogénéités dans les sols, avec des débits d'extraction compris entre 10 et 110 m³/h et des rayons d'influence variant de 2 à 11 m environ.

Au regard de la masse d'hydrocarbures calculée au sein de ces horizons et selon les rayons d'influence observés, un traitement par venting sur 12 mois aurait permis

Les essais d'injections ont été réalisés de -6 à -12 m de profondeur en deux étapes (down and up) différées dans le temps afin de laisser diffuser les réactifs et limiter la réactivité au contact du peroxyde d'hydrogène (réaction exothermique).

Des modes opératoires adaptés ont été établis afin d'optimiser l'efficacité du traitement tout en assurant la sécurité des intervenants. Des abattements significatifs des teneurs en hydrocarbures volatils ont ainsi pu être observés de 7 à 10 m de profondeur.

Le bilan massique calculé à l'issue des essais remettait en question la pertinence technico-économique d'un traitement principal par oxydation chimique, impliquant l'utilisation d'une quantité très importante de réactifs.

Les retours d'expérience de SERPOL sur un traitement par sparging/venting couplé à une oxydation chimique in situ ciblée et maîtrisée, démontrent du fait de l'effet de désorption, et donc de remobilisation dans les gaz du sol, de composés organiques volatils induit par l'oxydation, l'intérêt de l'association de ces techniques.

Cela permet d'optimiser la quantité de polluant récupérée par venting dans un délai réduit.

DIMENSIONNEMENT DE L'ECHELLE 1

Les essais pilote ont ainsi permis de répondre à la contrainte de dimensionner un traitement des zones résiduelles en 6 mois maximum, en retenant :

- La mise en place d'un traitement par venting / sparging avec injection d'air dans les horizons perméables en profondeur permettant le stripping et la remontée des COV vers la zone non saturée et leur extraction par venting ;
- Un traitement par oxydation chimique dans les horizons peu perméables entre 9 et 12 m de profondeur, contenant la majorité de la masse, permettant à la fois de dégrader les hydrocarbures et de renforcer l'action du traitement par sparging / venting.

CONCLUSION

Ce projet de réhabilitation des sols a été dimensionné selon les contraintes (délai, emprise, réseaux existants) du projet d'aménagement auxquels s'est ajouté une révision des zones d'intérêt, sur la base des investigations complémentaires, et une

Focus L'oxydation chimique comme soutien à un traitement de venting-sparging

L'oxydation chimique repose sur la dégradation des composés cibles par une réaction chimique d'oxydation. Le réactif (oxydant) est injecté dans le sol et réagit avec les composés cibles en provoquant leur dégradation.

Lorsque l'on traite un sol ou une nappe souterraine impactés par des hydrocarbures pétroliers avec une oxydation par la réaction de Fenton, les conditions physiques et thermodynamiques du milieu sont modifiées (destruction physique et création de chenaux, augmentation de la température engendrant ainsi la volatilisation des polluants, mise en contact d'un liquide réactif au sein d'une porosité de sol en zone non saturée).

C'est pourquoi lors des traitements Fenton, les effets observés sont :

- Une forte augmentation des composés organiques volatils en zone non saturée (ZNS) ;
- Une forte augmentation des hydrocarbures dissous en zone saturée (ZS), voire la libération de phase libre d'hydrocarbures observable au droit de piézomètres.

Les effets secondaires de l'oxydation vont donc être utilisés dans ce cas pour optimiser le traitement du sous-sol par sparging / venting.

Les effets directs ainsi quantifiables sur site sont :

- La dégradation chimique des hydrocarbures selon un dosage préalablement défini lors d'essais laboratoire ;
- Le stripping des polluants dissous en ZS par le sparging ;
- L'extraction des polluants volatils en ZNS par le venting ;
- Une biodégradation d'une partie des polluants dissous et adsorbés au-delà de la zone oxydée.



Figure 4 - Traitement à l'échelle 1

optimisation des techniques de traitement prédéfinies lors du PG grâce aux différents essais menés en laboratoire et sur site dans le cadre du PCT.

Les différents échanges entre le maître d'ouvrage, le bureau d'étude Antea Group et l'entreprise de travaux SERPOL lors de ce PCT ont permis de définir le meilleur scénario de traitement afin d'atteindre les objectifs fixés dans le délai imparti.

Au terme des 6 mois de traitement à l'échelle 1 (figure 4) selon le scénario retenu lors du PCT, il a été mesuré un abattement dans les sols de 82% de la masse initiale résiduelle.

Mélanie GILLES (SERPOL)

Cédric GOURVES (SERPOL)

// DOSSIER : ESSAIS PILOTES & PLANS DE CONCEPTION DES TRAVAUX (PCT)

BIOPILE THERMORÉGULÉE

POUR AMÉLIORER LE POTENTIEL DE DÉGRADATION DES HYDROCARBURES RÉCALCITRANTS

Les micro-organismes des sols sont comme tout le monde, ils travaillent mieux dans de bonnes conditions ! ORTEC SOLEO réalise depuis plusieurs années des essais de faisabilité en laboratoire et sur le terrain pour le compte d'EDF, afin d'optimiser la biodégradation aérobie des hydrocarbures récalcitrants présents dans les sols.

UN SIMPLE CONSTAT À L'ORIGINE DU PROJET

EDF remarque que les traitements biologiques de sols impactés par des hydrocarbures, notamment par des fractions lourdes, sont plus efficaces sur ses sites lorsqu'ils sont situés en milieu tropical qu'en milieu tempéré.

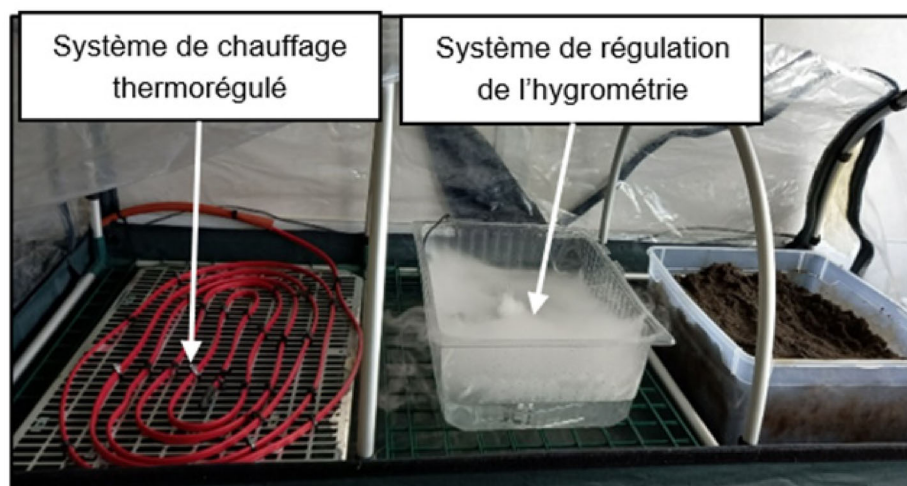
CHAUFFER LES SOLS POUR OPTIMISER LA BIODÉGRADATION : EST-CE PERTINENT ?

La première condition avant de stimuler la biodégradation, est que le polluant soit biodégradable.

Ensuite, le paramètre clé est l'oxygénation, puis un bon équilibre en nutriments, un pH et une humidité adaptés, une lithologie compatible et bien sûr une absence de toxicité du milieu.

Il est largement documenté que l'activité des bactéries double pour chaque augmentation de 10°C. Néanmoins, que l'on chauffe ou non, les abattements en polluants sont généralement similaires en fin de traitement.

Aussi, cette amélioration de la cinétique de dégradation est en général peu pertinente techniquement et économiquement si la contrainte de temps n'est pas forte.



Sols traités sous conditions contrôlées de chauffage (à gauche) et d'hygrométrie (au centre)

Le cas des sols d'EDF est particulier puisque, à matrice équivalente (pollution, lithologie...), les sols traités en conditions tropicales montraient clairement de meilleurs résultats que ceux traités en conditions tempérées. Un constat suffisant pour susciter cette étude !

VALIDATION DE LA FAISABILITÉ AU LABORATOIRE ET DIMENSIONNEMENT

PREMIERS ESSAIS (2019) :

L'objectif était de vérifier si l'efficacité observée sur les sites tropicaux pouvait être

simplement liée aux conditions tropicales (température de 30°C et humidité de 80%).

EDF a donc demandé à ORTEC SOLEO de réaliser des essais pour comparer la biodégradation aérobie de fuel lourd en conditions tempérées et en conditions tropicales.

Les sols présentaient à l'état initial une concentration en hydrocarbures de l'ordre de 4 000 mg/kg avec une majorité de C₁₀-C₂₂ correspondant à un mélange de fuel domestique et de fuel lourd. Après 90 jours d'incubation, les résultats ont montré que des conditions tropicales (30°C et 80% d'humidité) permettaient d'accélérer la biodégradation et le taux d'abattement des fractions lourdes (C₂₂-C₄₀) par rapport aux conditions tempérées (20°C en laboratoire et humidité ambiante de métropole), avec

des teneurs finales restant néanmoins du même ordre de grandeur (respectivement de l'ordre de 1 500 et 1 750 mg/kg).

La cinétique de biodégradation a été bien plus élevée avec des abattements importants constatés dès le premier mois dans la condition tropicale.

Des analyses biomoléculaires permettant de caractériser les communautés bactériennes impliquées dans la biodégradation des hydrocarbures et l'évolution des gènes de biodégradation ont également été réalisées en laboratoire spécialisé.

Néanmoins, à la suite de ces essais, des incertitudes subsistaient, liées aux hétérogénéités lithologiques et aux concentrations en hydrocarbures dans le sol (mélange FOD / fuel lourd) réparties de manière inégales au sein d'une matrice plutôt argileuse, mais également liées à la présence de FOD et pas seulement de fuel lourd, qui a pu faciliter la biodégradation.

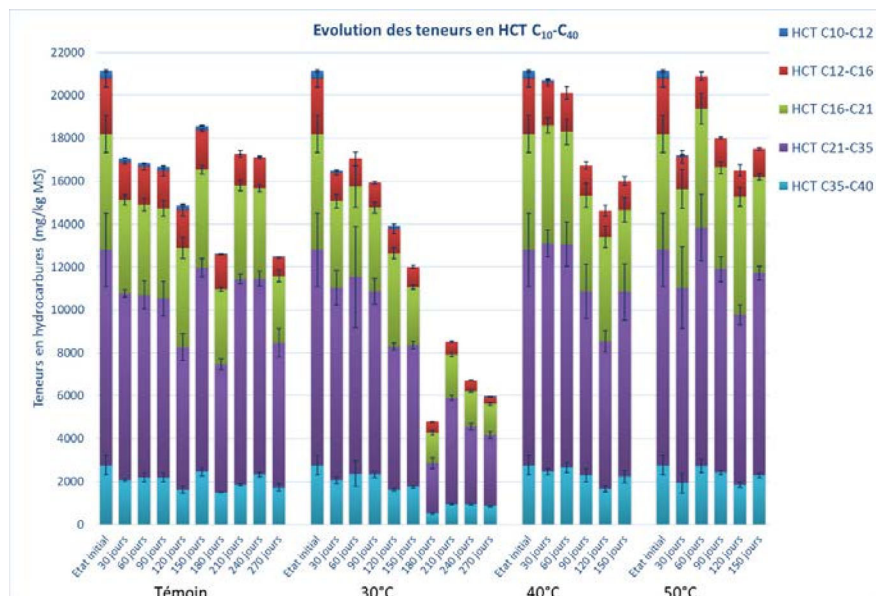
NOUVEAUX ESSAIS SUR NOUVELLES MATRICES (2021) :

Dans le cadre de nouveaux essais menés en 2021 dans des conditions similaires aux précédentes, la condition tempérée étant placée en extérieur sous abri couvert entre juin et novembre afin de se placer dans des conditions réelles et ne pas être sous 20°C contrôlé en laboratoire.

Les sols étaient cette fois homogènes, sableux et fortement contaminés par des hydrocarbures lourds sans présence de FOD.

La moyenne de tous les échantillons témoins sur l'ensemble de l'essai montrait une concentration moyenne de l'ordre de 7 300 mg/kg avec une majorité de C_{22} - C_{40} . Après contre-analyses dans un laboratoire concurrent, les témoins présentaient plutôt une moyenne de concentration de l'ordre de 12 800 mg/kg, plus cohérente avec les données de terrain.

La teneur finale était de l'ordre de 11 333 mg/kg à 150 jours dans la condition tempérée pour 3 833 mg/kg dans la condition tropicale, soit 66% d'abattement. Les résultats de ces essais ont montré que les conditions "tropicales" optimisées à 30°C sous une humidité de 80% permettaient donc d'accélérer les cinétiques de dégradation des hydrocarbures et en particulier sur les fractions lourdes (C_{21} - C_{40}) avec 62% d'abattement sur les C_{21} - C_{35} et 62% d'abattement sur les C_{35} - C_{40} .



Évolution des concentrations en hydrocarbures dans les sols soumis à différentes températures en fonction du temps

NOUVEAUX ESSAIS POUR COMPARER DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES (2022-2024) :

EDF a confié à ORTEC SOLEO l'évaluation de l'impact de différentes températures sur la biodégradation aérobie des hydrocarbures lourds. Les matrices utilisées étaient toujours les mêmes, néanmoins les concentrations en fuel lourd étaient bien plus élevées que lors de l'essai précédent. Ceci a impliqué une cinétique de biodégradation plus lente lors des premiers mois d'incubation par rapport à l'essai précédent.

Les températures testées étaient de 20°C, 30°C, 40°C et 50°C, toujours avec 80% d'humidité. L'objectif était d'identifier la ou les températures optimales de dégradation tout en minimisant les besoins de chauffage et donc les dépenses d'énergie.

Au bout de 9 mois d'essais, les sols sont passés de 21 700 mg/kg à environ 6 000 mg/kg, soit 73% d'abattement. Les résultats des essais ont confirmé que des conditions avec une température de 30°C et 80% d'humidité étaient les plus optimales pour la biodégradation aérobie des hydrocarbures des sols du site.

Une dernière série d'essais a été réalisée avec des concentrations moins élevées (environ 11 800 mg/kg pour la moyenne des témoins sur 270 jours). Les concentrations finales étaient de 2 900 mg/kg au bout de 270 jours, soit un taux d'abattement de 76% en fin d'essai (60% de l'abattement est déjà

obtenu au bout de 4 mois).

Ces essais complémentaires ont donc validé l'intérêt de réaliser un essai pilote sur terrain avec une biopile chauffée.

RÉALISATION DE L'ESSAI PILOTE TERRAIN

Une biopile thermorégulée de 100 m³ a été réalisée fin 2024. Les terres ont été amendées en nutriments puis mises en place avec un réseau de drains d'aération, d'irrigation et de chauffage. Le défi pour ce type de biopile est de chauffer les sols



Installation des systèmes de contrôle du chauffage, de l'humidité et de l'aération



Biopile thermorégulée pilote et son unité de traitement en cours d'exploitation

de manière homogène sans point chaud, puisqu'il a été démontré qu'à 40°C le traitement était moins efficace.

Ceci a nécessité de développer une nouvelle solution de chauffage basse température pour biopile, très différente de celle utilisée sur les piles chauffées classiques.

Des thermocouples ont été positionnés au cœur de la biopile de manière homogène pour monitorer et piloter le chauffage des sols. Des points de piquage pour la mesure ponctuelle de l'hygrométrie ont été placés sur le réseau d'air extrait.

Des turbines d'injection et d'extraction d'air permettent une aération optimale des terres, avec des débitmètres et des vannes de régulation. Des piquages pour le monitoring et les prélèvements de gaz en dynamique sont placés sur chaque arrivée.

Les gaz extraits sont traités sur un filtre à charbon actif. Un système d'humidification manuelle a été installé selon l'hygrométrie des gaz extraits, avec un point de piquage pour l'injection en ligne d'une solution de nutriments le cas échéant. Les éventuels lixiviats sont récupérés en point bas.

Le suivi analytique des sols durant le pilote est réalisé mensuellement à T1-2-4-6-9 mois, à raison d'un échantillon composite par lot d'environ 33 m³, soit 3 échantillons pour les hydrocarbures, les nutriments et autres paramètres biologiques.

Des analyses biomoléculaires sont également réalisées en parallèle sur

1 échantillon composite. Le suivi analytique des gaz du sol est réalisé au cœur de la biopile et dans les gaz extraits, ainsi que dans les éventuels lixiviats. Les paramètres O₂/CO₂, température et hygrométrie sont monitorés, ainsi que le suivi semi quantitatif des composés organiques volatils (COV).

UN PREMIER BILAN POSITIF !

Au bout de 1,5 mois de traitement, la température moyenne de la biopile chauffée se situe entre 25 et 35°C avec une hygrométrie moyenne entre 77 et 85%. Les premiers résultats de suivi indiquent des abattements de 17% à T+1mois.

Neuf mois de chauffage sont prévus, RDV fin 2025 pour les résultats !

Carole MARCON (ORTEC SOLEO)

Benjamin PIEL (EDF)

// DOSSIER : ESSAIS PILOTES & PLANS DE CONCEPTION DES TRAVAUX (PCT)

LA CLÉ D'UN DIMENSIONNEMENT RÉUSSI POUR UNE DÉPOLLUTION D'ENVERGURE :

LE PARTENARIAT ENTRE BUREAU D'ETUDES ET ENTREPRISE DE TRAVAUX

ZAN ou Zéro Artificialisation Nette, cette expression et son acronyme résonnent dans l'actualité depuis l'adoption de la loi Climat et Résilience d'Août 2021. Derrière cette volonté forte de freiner la consommation de nos sols nourriciers, il existe un véritable défi pour les aménageurs, les bureaux d'étude et les entreprises de travaux : redonner vie aux sites contaminés par de longues années d'exploitation industrielle. Mais retrouver cette deuxième jeunesse ne peut se faire sans une forte collaboration entre experts en Sites et Sols Pollués, bureaux d'étude et entreprises de travaux, au service d'un projet d'aménagement global.

LES OUTILS DE CONCEPTION DE TRAVAUX DE DÉPOLLUTION : DANS QUEL CONTEXTE ?

La Méthodologie Nationale des Sites et Sols Pollués a défini deux outils majeurs et interconnectés pour la réhabilitation d'anciens sites industriels : le Plan de Gestion et le Plan de Conception de Travaux.

Dans l'exemple développé ci-après, ces deux outils sont mis en œuvre conjointement dans un processus itératif où le partage d'expertise entre bureau d'étude et entreprise de travaux prend une place centrale.

Ancien site de production d'ouvrages en béton, l'histoire industrielle du terrain de près de 18 hectares remonte à la fin du XIX^{ème} siècle.

De nombreuses sources potentielles de pollution y ont été recensées. A travers de nombreuses campagnes d'investigations, deux zones de pollution concentrée en

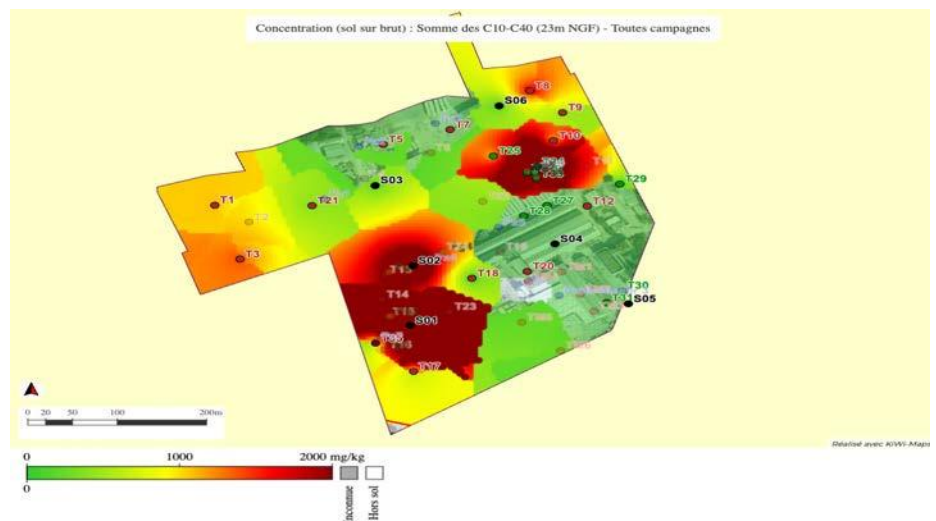


Figure 1 : Etat de contamination du site

hydrocarbures totaux et volatils (C_5-C_{40}) ont été définies dans les sols (Figure 1).

Elles représentent un volume d'environ 20 000 m³ mais nécessitent le terrassement de plus de 30 000 m³ pour les atteindre.

Le projet, portant sur le développement d'un

pôle d'activité intégrant un réaménagement urbain global, se précise en parallèle de l'avancée des différentes campagnes d'investigations menées sur site.

DU PLAN DE GESTION...

Dans ce contexte, le plan de gestion soulève plusieurs problématiques :

- Un volume important de pollution concentrée nécessitant un traitement spécifique;
- Un surplus important de déblais non inertes générés par le projet, qui doivent être gérés spécifiquement;
- Un projet d'ampleur structuré en plusieurs phases;
- Des besoins conséquents de matériaux pour les remblaiements;
- Un budget qui doit être maîtrisé.



Figure 2 : Installation du biotertre

APPROCHE ITÉRATIVE

Dans une démarche itérative, le plan de gestion évolue progressivement en fonction de la définition du projet, en étroite collaboration avec le Maître d'Ouvrage et son équipe de conception (architecte, BET...).

La problématique combinée d'un volume important de matériaux à traiter, d'un besoin conséquent en remblais et d'une nécessaire maîtrise financière oriente rapidement l'étude vers une solution de traitement "sur site" par biotertre.

Le traitement par biotertre consiste à terrasser les sols pollués et les disposer en tas (tertre) en vue de leur traitement.

Celui-ci se fait par ventilation et aspiration/filtration des gaz et par dégradation biologique grâce à la microflore indigène naturelle du sol, stimulée par apport d'oxygène et de nutriments. (Figure 2)

Cette solution est confortée par le phasage global des travaux, qui permet de disposer d'une zone dédiée à la mise en place des tertres tout en assurant une temporalité compatible avec ce type de traitement.

De plus, elle s'inscrit dans la volonté affirmée du Maître d'Ouvrage de développer un projet garantissant un bilan environnemental maîtrisé notamment au travers de la diminution des transports et des besoins en ressources naturelles.

TAUX D'ABATTEMENT ET VALIDATION DE LA SOLUTION

Après la définition des seuils de coupure, le plan de gestion explore les possibilités de réutilisation des matériaux sur site, en tenant compte de leur comptabilité sanitaire et environnementale, tout en intégrant les contraintes géotechniques et structurelles spécifiques aux futurs usages (voieries lourdes, légères, espaces verts, bâtiments...).

Dans ce cadre, une première estimation des taux d'abattement est réalisée pour les zones de pollution concentrée traitées par biotertre.

Toutefois, au regard du volume significatif de matériaux à traiter, des enjeux financiers associés et de la nature même de la pollution, dont une partie est peu à non volatile, un essai pilote s'impose comme une étape incontournable.

Celui-ci a un double objectif : valider la faisabilité technique du traitement et affiner les taux d'abattement attendus, garantissant ainsi l'efficacité du traitement.

Au croisement de l'ingénierie et des travaux, la conception et le dimensionnement de cet essai sont alors réalisés conjointement par SOLER IDE et COLAS ENVIRONNEMENT.

... AU PLAN DE CONCEPTION DE TRAVAUX

La stratégie "sur site" de dépollution établie grâce au Plan de Gestion, implique la mise en œuvre d'essais robustes pour déterminer précisément les paramètres de dimensionnement du traitement, sa durée, son coût et la faisabilité de l'atteinte des objectifs pré-déterminés au stade du Plan de Gestion.

Dans ce projet, les essais ont été réalisés d'abord en milieu contrôlé, via des essais en laboratoire puis sur site, par le biais d'un essai pilote.

L'essai sur site a notamment consisté en la mise en place de 3 biotertres "tailles réduites" dans 3 conditions distinctes : (Figure 3)

- Un biotertre non stimulé : sans apport d'oxygène, ni amendement en nutriments, favorable au développement bactérien et donc à la biodégradation. Ce biotertre constitue le témoin ;
- Un biotertre stimulé par l'apport d'oxygène et de compost riche en nutriments ;
- Un biotertre stimulé par l'apport d'oxygène, de compost et d'urée constituant un enrichissement en nutriments plus important.



Figure 3 : Mise en place de 3 biotertres pilotes

L'objectif est d'établir quelles conditions sont les plus favorables au biotraitement.

Le suivi a permis d'établir des bilans de l'activité microbienne, du dégazage et de la récupération de polluants volatils et *in fine* de l'abattement des concentrations en Hydrocarbures dans les 3 biotertres sur la durée du pilote (4 mois).

Les informations collectées ont été interprétées pour définir une durée de traitement pleine échelle sécuritaire et calculer des abattements atteignables sur les polluants.

Les essais ont également permis de mettre en évidence les limites de la technique proposée notamment liées à la nature intrinsèque des sols.

Ici, il a été noté une activité bactérienne modérée à faible en condition non stimulée. Ce constat permet d'anticiper la nécessité d'un apport contrôlé de nutriments et d'oxygène pour permettre une stimulation de l'activité bactérienne pour dégrader les hydrocarbures à un rendement intéressant.

Ces essais co construits et menés de manière collaborative par COLAS Environnement et SOLER IDE ont permis d'affiner les objectifs de dépollution en intégrant notamment une approche d'objectifs par fractions d'Hydrocarbures.

Des objectifs plus ambitieux ont ainsi été établis sur les fractions d'hydrocarbures les plus toxiques et mobiles qui sont également les plus faciles à traiter du fait de leur volatilité et leur biodégradabilité élevées.

A contrario, des objectifs moins élevés ont été définis pour les Hydrocarbures plus lourds. En effet, ces composés peu mobiles, présentent des risques environnementaux et sanitaires moindres.

Avantages du travail collaboratif Bureau d'Etudes et Entreprise de Travaux

Parce qu'une dépollution n'est jamais une fin en soi, elle doit être cohérente avec le projet plus global dans laquelle elle s'inscrit, pour qu'elle soit acceptée par le porteur de projet et réussie : conformité des obligations réglementaires, atteinte des objectifs, respect du délai et du budget.

Le cas concret présenté ici illustre la valeur ajoutée d'une collaboration étroite entre bureau d'études et entreprise de travaux en phase conception.

Le bureau d'étude, par son expertise dans le cadre du Plan de Gestion et sa vision globale du projet et des besoins client, permet de définir une stratégie pertinente conciliant obligations de gestion des sources concentrées et des risques et faisabilité technique de la solution.

L'entreprise de travaux, au travers du Plan de Conception de Travaux, apporte une vision technique et pragmatique sur le dimensionnement des travaux en permettant notamment d'affiner la faisabilité des objectifs.

La collaboration et la co construction du projet permettent de confronter intelligemment les expertises. Un double enjeu émerge pour chaque acteur :

Le bureau d'études est amené à challenger l'entreprise sur le dimensionnement d'une solution permettant l'atteinte d'objectifs ambitieux,

L'entreprise de travaux est amenée, en retour à challenger le bureau d'études en apportant une analyse critique des seuils définis, à la lumière des résultats des essais et des réalités physiques et opérationnelles.

Cette synergie associée à un travail itératif sont essentiels pour dimensionner une dépollution exigeante et réaliste.

CONCLUSION

L'approche "Plan de Gestion" basée sur la suppression des sources concentrées et l'acceptabilité des risques sanitaires et environnementaux associée à une approche de Conception de Travaux dont l'objectif est de déterminer la faisabilité technique de la solution ont ainsi permis de proposer des objectifs de réhabilitation crédibles et réalisables dans un temps et une enveloppe budgétaire acceptables pour le porteur de projet.

Mathilde DRAPIER (SOLER IDE)

Pierre ALLEGRE (COLAS Environnement)

// DOSSIER : ESSAIS PILOTES & PLANS DE CONCEPTION DES TRAVAUX (PCT)

IMPORTANCE DES ESSAIS PILOTES DE TERRAIN

POUR LA SÉCURISATION TECHNIQUE-ÉCONOMIQUE DES PROJETS DE RÉHABILITATION

Dans le cadre de la gestion du passif environnemental d'une usine en activité en région centre, l'application du guide du ministère de la transition écologique relatif aux plans de conception des travaux a permis la sécurisation du projet de réhabilitation sur le plan technico-économique. En effet, l'essai pilote de terrain a conduit à la remise en cause de la solution initialement prévue dans le plan de gestion pour s'orienter vers une nouvelle technique qui a montré ses performances et l'atteinte des objectifs de réhabilitation en traitement pleine-échelle.

LE CONTEXTE

La réhabilitation des sites et sols pollués a connu son plein essor durant les dernières décennies dans le but d'améliorer la qualité des milieux et de valoriser les friches industrielles.

Pour encadrer cette activité, la politique nationale de gestion des sites et sols pollués a vu le jour en 1997 et a été révisée en 2007 puis en 2017. Cette politique repose sur la gestion des risques sanitaires et environnementaux suivant l'usage des milieux.

Pour sécuriser les projets de réhabilitation sur le plan technico-économique, le guide ESTRAPOL relatif aux "Essais de faisabilité de traitement des sols pollués" et le guide du ministère de la transition écologique relatif au plan de conception des travaux (PCT) ont été publiés en 2019.

Cet article traite un cas pratique mettant en exergue l'importance d'un essai pilote de terrain mené conformément aux guides pour la sécurisation technico-économique d'un projet de réhabilitation d'un site industriel localisé en région centre.



Fig 1 : Délimitation de la zone de pollution concentrée

LES CONCLUSIONS DU PLAN DE GESTION

Dans le cadre de la gestion du passif environnemental d'une usine en activité en région centre, les investigations réalisées sur les milieux sol, gaz du sol et eaux souterraines ont mis en évidence la présence d'une zone de pollution concentrée en hydrocarbures C₁₀-C₄₀ [Fig 1].

Compte tenu des contraintes liées à l'activité du site et de l'emplacement de la zone de pollution concentrée au niveau d'une route vitale pour la production du site, le plan de gestion a privilégié la technique de traitement in-situ des sols par venting/bioventing pour atteindre l'objectif de réhabilitation fixé à 500 mg/kg MS en hydrocarbures C₁₀-C₄₀.

Cette solution de gestion a été prescrite dans un arrêté préfectoral complémentaire destiné à encadrer les travaux de réhabilitation des sols.

UN PLAN DE CONCEPTION DES TRAVAUX INDISPENSABLE

Pour sécuriser les travaux de réhabilitation, un plan de conception des travaux a été réalisé. Il comprenait la réalisation d'analyses de caractérisation préalable et d'un essai pilote de terrain pour vérifier la faisabilité du traitement des sols par venting/bioventing pour l'atteinte de l'objectif de réhabilitation [Fig.2].

Les essais de perméabilité à l'air et de rayons d'actions ont montré la faisabilité du traitement avec un rayon d'environ 5 m mais l'essai de performance n'a pas donné de résultats probants pour confirmer la technique retenue dans le plan de gestion.

Les résultats obtenus en termes d'évolution des concentrations et de flux massique des gaz extraits ont conduit à estimer un taux de performance optimal de 90%.

Ce taux optimal, mis en parallèle de l'objectif de réhabilitation [500 mg/kg pour une concentration maximale initiale de 14 000 mg/kg] n'a pas permis de confirmer la faisabilité du traitement in-situ par venting/bioventing.

LA NÉCESSITÉ DE METTRE À JOUR LE PLAN DE GESTION

Les conclusions du plan de conception des travaux ont nécessité une mise à jour du plan de gestion pour étudier une solution alternative consistant en l'excavation des terres polluées et le traitement sur site par biodégradation aérobie (biotertre sur site).

Cette solution a été privilégiée compte tenu de la présence d'un biotertre pour le traitement des terres impactées en hydrocarbures issues d'autres zones de pollution concentrée.

Un Arrêté Préfectoral complémentaire a été émis permettant de prescrire cette nouvelle mesure de gestion. Cette mise à jour a permis de maintenir les objectifs de réhabilitation initiaux.



Fig 2 : Réalisation de l'essai pilote de terrain

ET FINALEMENT LA MISE EN TRAITEMENT PLEINE-ÉCHELLE

Les travaux de réhabilitation de la zone d'étude se sont bien déroulés et ont mis en évidence la présence d'une fosse maçonnée remplie de gravats souillés aux hydrocarbures que les techniques de traitement in situ n'auraient pas pu traiter [Fig 3].

Par ailleurs, cette fosse a pu avoir une incidence sur les résultats obtenus lors de l'essai pilote à travers une réalimentation continue d'air pollué dans les gaz du sol.

Au total, 318 m³ de terres impactées ont été terrassés et mis en traitement en biotertre. Les travaux ont été réceptionnés avec des prélèvements de bord et de fond de fouilles jusqu'à l'atteinte de l'objectif de réhabilitation.

ENSEIGNEMENTS

Dans le cadre de la gestion d'un passif environnemental d'un site industriel en activité, le plan de gestion réalisé a mis en évidence la présence d'une zone de pollution concentrée en hydrocarbures et a proposé un traitement in-situ par venting/bioventing pour la réhabilitation de cette zone.

Le plan de conception de travaux réalisé sur la base d'un essai pilote de terrain a remis en cause la solution initialement retenue et a proposé une solution alternative par excavation et traitement par biodégradation sur site (biotertre).



Fig 3 : Mise en évidence de la fosse avec des déchets souillés par des hydrocarbures

Au final, la solution retenue a permis la réhabilitation de la zone et l'atteinte de l'objectif de réhabilitation fixé dans le plan de gestion.

Lotfi DRIDI (GINGER BURGEAP)

// ACTUALITÉ

LES DERNIÈRES PUBLICATIONS

SITES ET SOLS POLLUÉS



REGLEMENTATION

- [Loi n°2025-188 du jeudi 27 février 2025 visant à protéger la population des risques liés aux substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées](#)

GUIDES ET RAPPORTS



- [Outil de recherche des corrélations entre activités industrielles/artisanales et polluants potentiellement associés: V4 de la BD ActiviPoll et Matrice Activités-polluants](#) – 29 novembre 2024
- [Guide Fiches SSP – Techniques Innovantes V6](#) – 4 nouvelles fiches (échantillonneurs passifs à l'équilibre, échantillonneurs intégratifs passifs, électroremédiation fenton optimisée, télédétection aéroportée pour reconstruction 3D) – 2 décembre 2024
- [JT d'information et de REX de la gestion des SSP du 4/12/24](#) – Diaporamas
- [Glossaire SSP](#): Nouvelles définitions (cessation d'activité, pollution concentrée, pollution diffuse, remblai, source de pollution, surveillance des milieux) et définitions modifiées – 7 Janvier 2025
- [Guide polluants et comportement des polluants dans le milieu souterrain](#) – V3 – 2/12/24
- [Etat des lieux sur la méthodologie de diagnostic des sites pollués aux PFAS par l'utilisation des mousses anti-incendie](#) – 10/3/25



- [Comportement des PFAS dans les sols et les eaux souterraines – travaux expérimentaux](#) – 16 décembre 2024
- [Méthodologie pour encadrer l'usage de renaturation dans la gestion des sites et sols pollués : premier rapport d'étape](#) – 24/01/25
- [Microplastic releases in the European Union](#) – 31/01/25



- [Fonds Vert](#) – études et travaux de dépollution d'une friche – [Conditions d'éligibilité et de financement](#) – 2/01/25.
- Benchmark international sur la gestion des sites à responsables défaillants et des friches – AECOM – Décembre 2024
[Synthèse](#) (16 pages) et [Rapport complet](#) (119 pages)
- [Avis de l'Ademe: la sobriété foncière pour atteindre le ZAN, un atout pour les territoires](#) – Décembre 2024
- [DESIVILLE : où et comment désimperméabiliser les sols urbains ?](#) Décembre 2024
- [BAPPPOP : Mise à jour de la base de données sur la contamination des plantes potagères par les molécules organiques polluantes](#) – Octobre 2024

pollutec



Là où s'invente
le monde durable

7-10 OCT.
2025

LYON
EUREXPO
FRANCE

upds **MAG**
LE MAGAZINE DES PROFESSIONNELS
DE LA DÉPOLLUTION DES SITES

 **upds**
Union des Professionnels
de la Dépollution des Sites.

183 Av. Georges Clémenceau
92000 Nanterre
T : 01 47 24 78 54
www.upds.org