

Focus sur les atouts et les freins

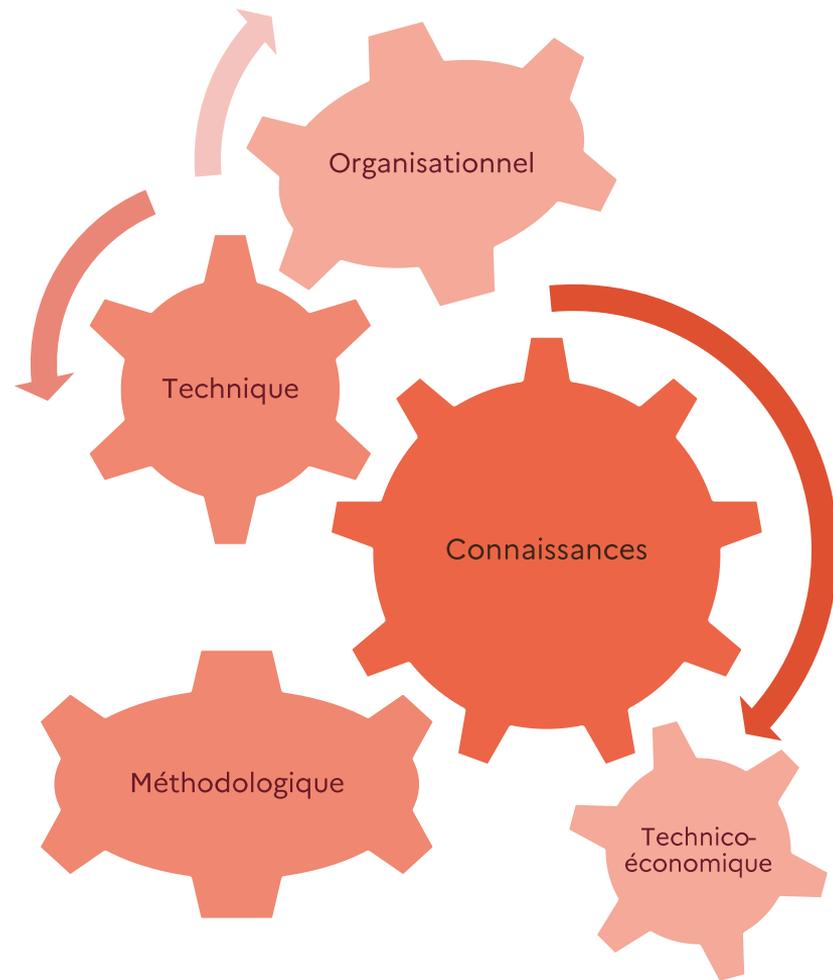
Illustration par des retours d'expérience

TAUW Sébastien KASKASSIAN

epfl SAVOIE Emeline DHAINAUT

Fertil'innov
ENVIRONNEMENT Souhir SOUSSOU

FCBA Michael LECOURT
INSTITUT TECHNOLOGIQUE





Mise en sécurité de la mine des Avinières, Site RECYLEX, Saint Laurent Le Minier (30)

REALISATION DE TRAVAUX DE PHYTOSTABILISATION

- Supervision : ADEME
- Conception et suivi des travaux : MICA Environnement
- Phytostabilisation: Fertil'Innov Environnement



Parcelles d'essais après le semis



6 mois après le semis



12 mois après le semis



18 mois après le semis

Conclusions :

- *Importance de corriger les propriétés physico-chimique de substrat avant le semis : Amélioration de la fertilité du sol pour favoriser l'installation des végétaux*
- *Seules les espèces provenant du site sont capables de résister au stress métallique. Les espèces non adaptées ne sont pas retenues pour la phytostabilisation (travaux de revégétalisation prévus en 2022)*

✓ *Préservation de la biodiversité locale*

Plan de Conception de Travaux (PCT) - Pilotes de traitement de sols fortement contaminés aux HCT par Rhizo-dégradation

Octobre 2017 – Juin 2021

Durée : 42 mois

Industriel pétrolier

8 partenaires impliqués :

SYNLAB – EUROFINIS – INTERTEK –
HYDREKA – ELISOL – LEB Aquitaine
– ALGADE – Université de Lorraine

Contexte et leviers

- **Lieu** : Sud-Ouest, France
- **Site** : dépôt sols pollués, zone agricole, isolé
- **Enjeux** : 15 000 m³ de sols impactés en hydrocarbures peu disponibles (aliphatiques C12-C30 majoritaires), teneurs : 29 000 ± 10 000 mg/kg MS
- **Spécificités de la mission** : démarche R&D conjointe de TAUW France et de l'industriel
- **Leviers en faveur du phytomanagement** :
 - Site isolé, absence d'énergie, zone agricole
 - Volumes importants, aspects économiques
 - Démarche proactive du donneur d'ordre
 - Image de marque / intégration paysagère
 - Peu de contrainte temporelle

Témoignage de l'industriel :

"Les résultats sont très satisfaisants et encourageants pour apporter une solution opérationnelle"



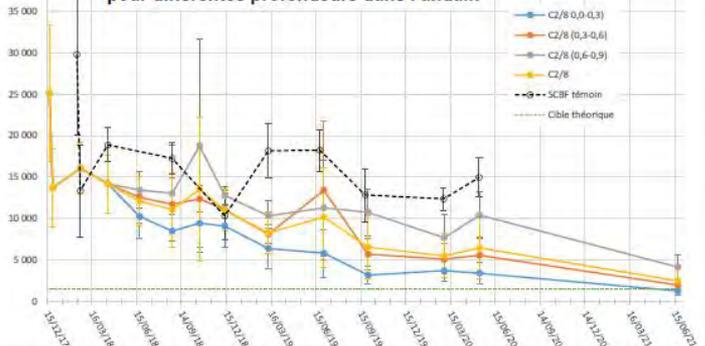
Pilotes de terrain

- **Andains sur site** : 50 à 100 m³ chacun
- **Bio-piles** : malaxage mécanique tous les 2-3mois
- **Rhizo-piles** : idem bio-piles pendant 4 mois puis
 - ensemencement à T = 4mois (ré-ensemencement à 10 mois)
 - **Luzerne** mycorhizée et **Raygrass**
- **Amendements** : 2 dilutions différentes de sols pollués, apports de terre végétale, de compost mature, d'urée et de chaux (pour certains andains)
- **Témoins** : 1 témoin végétalisé sans pollution (terre végétale) + 1 témoin pollué couvert et non malaxé
- **Suivis** : tous les 2-3mois, paramètres physiques, chimiques, biologiques dans les sols et végétaux + Test d'écotoxicité, santé et quantité des végétaux.

Résultats après 42 mois

- **Performances** :
 - **Abattement de 91 %** de la masse en polluants, Teneur résiduelles < 1 700 ± 1 500 mg/kg MS
 - Après 24 mois, **performances similaires Bio-piles vs. Rhizo-piles**
 - **Amélioration des fonctions** du technosol créé au cours du temps **grâce au phytomanagement**
 - Très faible transfert aux végétaux (luzerne, maïs), absence d'écotoxicité
- **Atouts du phytomanagement** : **technique plus économe** (coût financier, bilan CO₂, ressources naturelles et énergie) vs. hors site (transport, traitement) et sur site (malaxage), **positive** (intégration paysagère, image, occupation flexible des friches rurales et urbaines, participation de la filière « agricole » locale) **et durable** (refonctionnalisation des sols, valorisation des végétaux, biodiversité, flot de chaleur, captation CO₂)
- **Limites et questions** : **disponibilité** (temps et espace, suivi écologique), **volonté** (MOA, administrations), **vers de nouveaux usages / nouvelles filières** (devenir des végétaux, usage agricole du sol, filière agro-environnement) ?

Suivi de l'évolution des teneurs en HCT pour différentes profondeurs dans l'andain



Mardi 9 novembre 2021

**Organisée par l'Ineris et le BRGM, en concertation avec le
Ministère de la transition écologique**

**Valorisations de fibres végétales
issues de biomasses produites
sur sols contaminés**



L'objectif, les contextes, les applications

- ✓ 3,5 ans
- ✓ 4 partenaires
- ✓ 3 matières premières
- ✓ 9 valorisations



Une démarche en 2 étapes

✓ Evaluation technique

• Des contaminants

- Éléments de la faune
- La flore

• Réalisations de produits manufacturés à partir

- De ressources forestières
 - peuplier
 - aulne
- De plantes compagnons – les orties

✓ Etudes des impacts sociétaux

- Environnementaux
- Économiques
- Écologiques



Conclusions – les avancées grâce au projet

- ✓ **La valorisation de ressources issues de sols contaminés en matériau est possible**
 - Validation technique
 - Validation sanitaire
- ✓ **L'exploitation des sols contaminés pour une industrie manufacturière a du sens**
 - Monétaire : bilans économiques positifs
 - Environnementaux : des indices favorables
- ✓ **Des points à approfondir**
 - Déterminer les potentiels – surfaces exploitables
 - Valider la régularité de la composition chimique
 - Elargir la nature des contaminants
 - Evaluer d'autres essences à potentiel de valorisation

 **PHYTOFIBER**

Merci pour votre intérêt



www.phytofiber.fr



Focus sur les atouts et les freins

Questions – Réponses

TAUW Sébastien KASKASSIAN

epfl SAVOIE Emeline DHAINAUT

Fertil'innov
ENVIRONNEMENT Souhir SOUSSOU

FCBA Institut Technologique Michael LECOURT



FAQ Table ronde

Q : Pensez-vous que la technique de phytostabilisation puisse être utilisée en toute sécurité dans des espaces verts de collège pour permettre effectivement d'éviter le confinement par recouvrement classiquement proposé par les bureaux d'études ? Considère-t-on qu'il existe un risque d'exposition pour des personnes qui s'introduiraient sur le site ? Le risque de ré-envol de poussières de sol contaminé est-il pris en compte pour les riverains ? Est-il nécessaire de prévoir des interdictions d'accès au site pendant la période de phytoremédiation ?

R : *Les phytotechnologies permettent de recouvrir le sol pollué avec des espèces végétales adaptées formant un couvert dense et pérenne qui limite l'envol de poussières et forme une barrière physique avec le sol. Le suivi régulier du couvert végétal doit permettre de vérifier l'efficacité de cette mesure de gestion. La pose de panneau informant sur cette façon de gérer un site pollué, l'implantation d'une barrière (végétation arbustive, clôture, etc.) et le contrôle de l'accès au site par la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'oeuvre sont des mesures qui pourront prévenir l'intrusion de personnes sur cet espace.*

FAQ Table ronde

Q : Avez-vous réussi à garantir l'absence d'envol particulière lors de la phase de préparation des sols pour la mise en place de la phytostabilisation?

R : Afin d'éviter l'exposition des personnels travaillant sur un site pollué lors de la préparation des sols, il faut veiller à informer les personnels non habitués à travailler sur des sols pollués aux pratiques des professionnels des sols pollués notamment pour le port des équipements de protection individuel (ex : vêtements à usage unique ou dédiés au chantier, port de gants et de masque anti-poussière). Un arrosage est mis en place afin de supprimer l'envol de poussière lors des travaux.

Q : En cas d'amendement du sol, quid de la problématique des plantes invasives type renouée du japon?

R : Il existe peu de retour d'expérience sur ce point. Un projet de recherche a montré que la renouée du Japon était tolérante aux polluants, en particulier les éléments traces métalliques (ETM) sans les accumuler, et que sa vigueur était réduite en présence d'espèces végétales compétitrices telles que les Poacées.

FAQ Table ronde

Q : La modification de mobilité des polluants a t'elle été étudiée, en rapport avec la correction des paramètres physico-chimiques du sol (amendements) ?

R : Le choix des amendements est généralement étudié en laboratoire et/ou en parcelle sur site puis validé afin de maîtriser la biodisponibilité des polluants métalliques.

Q : quelle est la représentativité des essais de laboratoires pour des phytotechnologies par rapport à des essais sur sites (bacs tests sur place)?

R : L'extrapolation des résultats en pots au laboratoire n'étant pas garantie, les essais sur site sont à privilégier dans le cadre du plan de conception des travaux (PCT).

FAQ Table ronde

Q : Comment évaluer et garantir la stabilité des éléments métalliques dans le sol sur le long terme ?

R : L'objectif de la phytostabilisation aidée est de confiner in situ les polluants métalliques. Les racines stabilisent le substrat et l'installation d'un couvert végétal dense et pérenne permet de limiter l'érosion. Seuls quelques essais de long terme (entre 10 et 20 ans) ont été menés en phytostabilisation aidée dans le cadre de projets de recherche. Comme pour toute technique de gestion des sites et sols pollués, le suivi permet d'évaluer l'efficacité des espèces végétales et des éventuels amendements sur le long terme et d'adapter la technique le cas échéant en fonction de la pollution, des risques et des objectifs visés (ex : nouveaux semis/plantations ; nouvel apport d'amendement).

FAQ Table ronde

Q : Une re-déposition en surface des sols des éléments traces métalliques et métalloïdes (ETMM) n'est-elle pas à craindre à terme, du fait de la translocation des ETMM (même minime) dans les plantes qui sècheraient sur place en période hivernale?

R : *Pour éviter la remobilisation éventuelle des ETMM à la suite de la décomposition de la matière organique, la gestion de la biomasse végétale produite sur le site pollué est à envisager (exportation vers une filière ad hoc de valorisation ou d'élimination).*

FAQ Table ronde

Q : Dans le cadre de l'amélioration du substrat, avez vous réalisé des mesures du carbone microbien (qui reflète la quantité de micro-organismes) et la respiration microbienne (qui reflète son activité globale, sa capacité à décomposer les matières organiques). Avez-vous diagnostiqué les sols de manière à les amender par la suite ? Des essais pilotes en laboratoire sont-ils réalisés en amont du traitement?

R : *Un diagnostic complet du substrat est réalisé avant et après ajout d'amendement (caractéristiques pédo-agronomiques, physico-chimiques et biologiques). Avant de passer aux essais in situ, une première phase en laboratoire dans des conditions contrôlées (essais de phytotoxicité, essais de lixiviation, essais sur plantes,...) afin de corriger les propriétés physico-chimiques et biologiques du substrat peut-être nécessaire voire indispensable. La biomasse microbienne et l'activité enzymatique sont suivies et contrôlées dans l'objectif d'obtenir un substrat fertile.*

FAQ Table ronde

Q : A t-il été étudié la possibilité de valorisation des éléments traces métalliques (ETM) et notamment le zinc?

R : La valorisation des ETM dans la biomasse végétale produite sur site pollué fait l'objet de recherches qui portent en particulier sur les plantes (hyper)accumulatrices. Concernant le Zn, des résultats de recherche ont été publiés et concernent notamment la filière chimie verte (écocatalyseurs de Zn).

FAQ Table ronde

Q : Les hydrocarbures de type essence sont naturellement bien dégradés dans les sols par voie aérobie (voie microbienne). Un comparatif entre tertres végétalisés et non végétalisés a-t-il été fait pour vérifier que la végétalisation a réellement apporté un gain sur l'efficacité / la rapidité de traitement par rapport aux traitements plus classiques sur site ?

R : Dans le cadre du retour d'expérience en phyto-rhizodégradation des HCT présenté, la pollution est une coupe Diesel ou FOD dégradée (principalement des C12-C30 dont 70% d'aliphatiques, 25% d'aromatiques et 5% de produits polaires). Plusieurs essais comparatifs d'andains ont été menés pendant 30 mois: biotertres non végétalisés (malaxage mécanique tous les 2 mois) et végétalisés (malaxage mécanique sur 4 mois puis installation de la végétation). Les végétaux se sont développés jusqu'à 47 mois sans malaxage et sans système d'aération. En 1^{ère} année, les cinétiques et abattements sont meilleures en biotertres non végétalisés. Les résultats après 30 mois de suivi sont similaires dans les 2 modalités:

-Bioterre non végétalisée (toute la hauteur de l'andain soit environ 1m) = -47% en année 1; -34% en année 2;

-Bioterre végétalisée (de 0 à 60cm) = -37% en année 1; -48% en année 2.

FAQ Table ronde

Q : La dégradation est-elle homogène sur toutes les coupes hydrocarbures (HC), ou bien certaines coupes sont mieux dégradées que d'autres, et finalement le résiduel serait presque la concentration initiale des coupes non dégradées ?

R : *Sur la base d'un retour d'expérience en phyto-rhizodégradation des HCT où la pollution est une coupe Diesel ou FOD dégradée (principalement des C12-C30, 70% aliphatiques, 25% aromatiques, 5% de produits polaires), au cours des traitements (biotertres classique ou végétalisé), toutes les coupes HC sont dégradées au cours du temps avec des cinétiques différentes.*

Par comparaison, les temps de $\frac{1}{2}$ vie mesurés sont les suivants :

-pour la somme TPH C10-C35 = environ 1 an;

-pour la fraction C10-C12 = environ 6 mois;

-pour la fraction C21-C35 = entre 2 et 2,5 ans. Après 30 mois (seul 1 des andains a fait l'objet d'un suivi jusqu'au 47^{ème} mois), les teneurs en coupes « lourdes » ont baissé de moitié.

FAQ Table ronde

Q : Avez-vous suivi les molécules organiques oxygénées produites ? Si oui, de quelles molécules oxygénées s'agit-il, à quelles concentrations ?

R : *Dans le cadre du retour d'expérience en phyto-rhizodégradation des HCT présenté, les molécules organiques oxygénées produites ont été suivies (PH C5-C35 avec split Aro-Ali). Sur le site, la pollution est une coupe Diesel ou FOD dégradée composée de: C12-C30 dont 70% aliphatiques et 25% aromatiques (alkyl-Naphtalènes, Phénanthrène et alkyl-Phénanthrènes, DiBenzoThiophène et alkyl-DiBenzoThiophènes), 5% de produits polaires (acides carboxyliques linéaires (16 à 18 carbones), des alcools primaires linéaires (20 à 28 carbones), des stérols et du glycérol).*

Les concentrations totales ont évolué de 15 000 mg/kg environ initialement à 4000 mg/kg environ en fin de traitement. Les fractions en composés polaires sont passées de 5 à 35% en 2 ans (contre 70 à 50 % en TPH aliphatiques et 25 à 15% en TPH aromatiques). Ces tendances sont identiques dans les biotertres ou les tertres végétalisées.

FAQ Table ronde

Q : La pollution intégrait-elle des molécules organiques oxygénées type MTBE/TBA ? Si oui, la luzerne était-elle efficace?

R : Dans le cas du retour d'expérience en phyto-rhizodégradation des HCT, il n'y avait pas de MTBE/TBA sur le site. A notre connaissance, il n'existe pas de retour d'expérience sur ces molécules avec la luzerne.

Q : Est ce que la présence d'un "traitement" ancien (par exemple chaulage des matériaux, courant dans certaines activités pétrolières) peut être un frein à la rhizo-dégradation ?

R : Ce point est peu documenté. Sur la base d'un retour d'expérience en phyto-rhizodégradation des HCT, les andains « chaulés » (0,25% en masse) montrent lors des 6 à 10 premiers mois de suivi, des performances moindres en comparaison des andains « non chaulés » (moins de dégradation, mauvaise qualité des végétaux). Après un an de suivi, les indicateurs de performances (pH, diminution des teneurs en HCT, croissance des végétaux, etc.) sont identiques entre les 2 modalités.

FAQ Table ronde

Q : Quels types de plantes sont utilisés et à utiliser pour le phytotraitement ?

R : En phytostabilisation, les espèces végétales n'accumulant pas les polluants dans les parties récoltables ou valorisables sont à privilégier (ex : famille des Poacées). A l'inverse, les espèces végétales (hyper)accumulant les polluants sont à privilégier en phytoextraction (ex : famille des Brassicaceae). Concernant les polluants organiques, toutes les espèces végétales sont pertinentes car elles favorisent, notamment, le développement des microorganismes à l'origine de la dégradation de ces polluants.

Q : Existe-t-il des essais pilote de mycoremédiation avec des résultats intéressants?

R : Les champignons n'étant pas des espèces végétales, la mycoremédiation n'est pas une phytotechnologie. Pour plus d'information sur la mycoremédiation voir le site : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Mycorem%C3%A9diation>.

FAQ Table ronde

Q : Comment communiquer sur les phytotechnologies?

R : Le retour d'expérience concernant la communication sur la gestion de sites pollués par les phytotechnologies indique l'utilisation d'outils tels que la mise en place de panneaux d'information au droit du site, l'organisation de réunions publiques et avec les acteurs concernés et la diffusion d'information via les moyens de communication des collectivités (journaux municipaux, etc.) permettant d'expliquer les principes et objectifs de ces techniques avec leurs avantages et leurs limites.