



Le sol est une ressource non renouvelable à l'échelle humaine, qui remplit une multitude de fonctions essentielles à la vie mais est également soumise à des menaces de plus en plus nombreuses (contamination, étalement urbain...), qui affectent les fonctions des sols et génèrent des externalités négatives importantes. **L'APR GESIPOL vise donc la lutte contre les pollutions industrielles, la dégradation des milieux sol, air, eaux souterraines et biosphère et la valorisation de la ressource foncière constituée par les sites et sols pollués.**

LISTE DE PROJETS LAUREATS

APR GESIPOL – 3e édition 2015 – liste des projets lauréats

La troisième édition de l'APR GESIPOL vise les 2 axes thématiques complémentaires :

- Axe 1 : innover et améliorer les techniques de traitement appliquées aux sols et aux eaux souterraines et évaluer leurs performances
- Axe 2 : développer les techniques de re-fonctionnalisation des espaces dégradés

Au terme du processus de sélection de l'édition 2015, 7 projets ont été sélectionnés pour une aide ADEME d'environ 2,1 M€.

Acronyme	Contenu du projet	Coordinateur, partenaires
SoSie	Estimation de la saturation en NAPL (So-oil saturation), impact de la Saturation initiale et de l'historique sur les saturations résiduelles – Sols pollués par des hydrocarbures pétroliers dans la zone de battement de nappe	I2M Bordeaux, BURGEAP, IMFT, EUROFINs
MISS	Microcosmes in-situ servant au dimensionnement des dépollutions par bio-stimulation	Tauw France, ENOVEO, Ecole Centrale Lyon
FAMOUS	Utilisation de mousses pour le traitement de nappes hétérogènes à forte vélocité polluées par des composés chlorés lourds (DNAPL)	SOLVAY, SERPOL, BRGM, I2M Bordeaux, Université de Franche Comté
OPTIMEX	Optimisation de l'extraction multiphasique	ENISE, INSA Lyon, EIFFAGE GC
BIOTUBES	Bio-technosols urbains en faveur de la biodiversité et des services écosystémiques	VALORHIZ, ELISOL, BRGM
PIEGEACHLOR	Piégeage des composés halogénés lipophiles organiques rémanents	Université Lorraine (URAFPA), INRA ECOSYS, IRD, INRA LAS, Université Lorraine (LAE), Carbo France
MisChar	Refonctionnalisation de sols multicontaminés au moyen d'un biochar de miscanthus : viabilité écologique et intérêt socio-économique de modes de gestion en milieux agricole et urbain	ISA (LGCgE), Univ Lille 1, INRA AgroParisTech GRECAT, Univ Catholique de Louvain – Belgique, EPF NPdC, Chambre Régionale d'Agriculture du NPdC, Groupe Agriopale, EACM, Norenvert, Néo-Eco Développement, Team ²

Résumés non confidentiels des projets

SoSie

Les cas de pollution de sites par des hydrocarbures sont nombreux et récurrents depuis le début du XXème siècle en Europe comme sur les autres continents. Ce type de pollution, quand elle est conséquente, peut engendrer la présence d'une phase organique (ou « NAPL » pour Non Aqueous Phase Liquid) mobile qui s'accumule au toit de la nappe, formant ainsi une phase flottante. Plusieurs difficultés dans les pratiques de gestion de ces pollutions, qui se concentrent dans la zone de battement de nappe, ont été identifiées : mesures biaisées de concentrations en hydrocarbures dans les sols, incohérence entre concentrations dans les sols et épaisseurs de « flottant » mesurés dans les puits à proximité, méconnaissance des valeurs de la saturation résiduelle en NAPL (Sor), variabilité de la Sor avec l'historique de pollution et les battements de nappe, biais entre les résultats de dimensionnement par modélisation et les résultats d'opérations de pompage/écrémage.

L'objectif du projet SoSie, proposé par un consortium comprenant une société d'ingénierie (BURGEAP), un laboratoire d'analyses (EUROFINS) et deux laboratoires de recherche (I2M, IMFT), vise à contribuer à combler ces lacunes à travers différents travaux de recherche :

- le développement d'un protocole d'échantillonnage/analyse de sols adapté à des échantillons contenant potentiellement du NAPL mobile
- la détermination de valeurs de saturation résiduelle sur des échantillons de sols provenant d'un site industriel pollué
- l'étude de l'influence de la saturation en NAPL initiale sur la saturation résiduelle
- l'évaluation de l'impact des cycles d'imbibition / drainage sur la valeur de la saturation résiduelle
- la mise en œuvre d'outils de modélisation en vue de confronter leurs résultats aux données mesurées (carottes de laboratoire, site industriel) et tester leur sensibilité aux paramètres d'entrée afin d'évaluer leur pertinence (i) à l'étape du diagnostic pour la caractérisation des fractions mobile, immobile et récupérable de NAPL (LDRM) et (ii) à l'étape du dimensionnement/suivi d'une opération de pompage/écrémage (SIMUSCOPP).

Les travaux seront menés dans les laboratoires de recherche (colonne de sols synthétiques et réels, micro-modèles), dans le laboratoire commercial (protocole d'échantillonnage/analyse), et sur un site industriel (protocole d'échantillonnage/analyse, diagnostic et pilote de pompage/écrémage).

Les résultats attendus sont les suivants :

- un protocole innovant d'échantillonnage/d'analyse de sols adapté à des échantillons contenant potentiellement du NAPL mobile (en priorité dans la zone de battement de nappe et marginalement à l'interface aquifère/substratum où du DNAPL peut être présent), qui a vocation à être proposé aux prestataires concernés par la gestion des sites pollués comme un nouveau service fourni par les laboratoires commerciaux
- l'amélioration de la connaissance des valeurs de Sor et de leur variabilité avec la saturation initiale et les battements de nappe devrait permettre une meilleure estimation des volumes et masses de polluants dans les sols ainsi que des fractions mobile, immobile et récupérable. Ces données expérimentales alimenteront par ailleurs les bases de données de Sor, utiles pour interpréter les données de terrain et alimenter les logiciels de calcul. Ces résultats seront valorisés sous forme de recommandations méthodologiques dans un guide public
- les travaux de modélisation seront valorisés sous forme de recommandations méthodologiques portant sur l'utilisation des logiciels, le choix des paramètres d'entrée à acquérir dans le cadre d'un essai de pompage/écrémage, la sensibilité et les incertitudes sur les résultats. Ces recommandations pourraient notamment contribuer à nourrir les cahiers des charges des essais de faisabilité/dimensionnement des techniques de dépollution envisagés par le MEDDE dans les futurs plans de gestion.

MISS

L'objectif du projet MISS est de développer et de valider un dispositif à déployer dans des piézomètres pour réaliser un essai microcosme in-situ en conditions passives. Cet essai in situ permet d'évaluer le potentiel de biodégradation (naturelle ou stimulée), d'en estimer les cinétiques en conditions réelles et de déterminer le type de substrat le plus performant pour la stimulation des mécanismes biologiques. Ces données estimées en différents endroits dans le panache de pollution permettront de dimensionner avec plus de fiabilité une solution de dépollution du site par biostimulation. Ces solutions sont des modes de gestion performants notamment dans le cas de sites complexes (écoulements, mélange de polluants, accès difficiles ou contexte urbain) où les alternatives peuvent s'avérer très coûteuses.

Comparativement à un essai microcosme en laboratoire (essai statique en flacon fermé, type batch), le Microcosme In-Situ permet de s'affranchir des difficultés du laboratoire à reproduire les conditions biogéochimiques présentes sur site et évite les biais du laboratoire tels que l'absence d'écoulement et le contact parfait entre polluants / substrats / bactéries dans les flacons.

Comparativement à un essai pilote sur site, le dispositif MISS mobilise des ressources moindres car le dispositif stimule localement au sein d'un horizon du piézomètre la biodégradation des polluants de manière passive.

Enfin, le dispositif permettra de comparer, en conditions passives et sur une durée de quelques mois, les performances relatives de l'Atténuation Naturelle (AN) et de différentes conditions de biostimulation (variation de la nature et /ou de la dose du substrat de croissance ajouté).

Le projet MISS permet de dimensionner (au laboratoire) et de tester (sur un site industriel) le dispositif à développer afin d'en valider l'intérêt.

Le dispositif MISS est constitué de 3 modules isolés entre eux par des joints souples : un module non stimulé (dégradation naturelle) et deux modules incluant chacun un substrat de stimulation différent. Au sein de chaque module, différents types d'échantillonneurs passifs sont assemblés pour analyser la quantité et la diversité des populations bactériennes développées (support solide passif EMP), les concentrations en polluants organiques, en ions (sulfates, sulfures, nitrates, ammonium), en gaz dissous (méthane, éthène, éthane), en carbone organique dissous (COD) ainsi qu'un élément permettant de libérer progressivement dans le temps le substrat carboné de biostimulation. Pour réaliser un suivi temporel des paramètres et donc une estimation des cinétiques de biodégradation, plusieurs unités MISS, constituées chacune de 3 modules, peuvent être placées dans le piézomètre et ensuite successivement retirées à des temps différents.

Dans ce projet et sur le site d'expérimentation, les polluants visés sont des solvants chlorés mais le dispositif peut également être adapté à tout autre type de polluants organiques tels que les hydrocarbures pétroliers (BTEX, alcanes, HAP ...).

La validation du dispositif en laboratoire et sur site passe par la capacité à combiner les différents échantillonneurs et le module libérant le substrat carboné dans une structure de faibles dimensions afin de pouvoir proposer un dispositif universel applicable sur n'importe quel site. Outre les verrous techniques de dimensionnement, les verrous scientifiques liés au choix et à l'influence du substrat de stimulation sur les équilibres entre les populations microbiennes seront étudiés.

La validation de la technologie se fera au regard de l'amélioration des essais de dimensionnement existant actuellement notamment dans la réduction des incertitudes et la sécurisation de la prise de décision du fait d'une meilleure représentativité de ces essais in situ.

FAMOUS

Dans les aquifères, l'hétérogénéité du milieu induit des écoulements préférentiels, entraînant de facto une difficulté d'injection de certains additifs dans les zones de plus faibles perméabilités (généralement plus polluées du fait de surfaces spécifiques plus importantes). Les rendements épuratoires s'en trouvent affectés puisque les contacts intimes polluants/additifs ne sont pas optimaux.

L'injection de mousses présente une alternative innovante et de grand intérêt industriel pour la remédiation in situ des sols pollués notamment pour les sites présentant des perméabilités importantes et une forte hétérogénéité. Le site pilote de Pont-de Claix présente ses caractéristiques.

FAMOUS se propose de réaliser des essais expérimentaux et de terrain, ainsi que des modélisations, afin d'étudier (dans le cadre de la recherche fondamentale et industrielle) les effets bloquant des pores, vectorisation de Fe et gaz, et mobilisation des polluants.

Le projet vise donc à améliorer le traitement in situ de composés organiques Polluants Organiques Persistants (hexachlorocyclohexanes) et des organochlorés lourds (essentiellement des trichlorobenzènes) dans des nappes phréatiques hétérogènes à forte vélocité. Pour se faire l'utilisation de mousses sera étudiée en utilisant dépendamment de sa formulation, de son mode d'application ses propriétés de blocages/vectorisations/désorption. Deux grandes familles de mousses seront testées et utilisées dans ce projet : i. mousses/polymères à effets bloquants et ii. mousses de désorption/vectorisation.

- Mousses/polymères à effets bloquants : Les effets bloquants des mousses seront étudiés dans le but de diminuer la circulation d'eau dans la zone à traiter. Le défi est de travailler avec des mousses stabilisées dans des aquifères de perméabilités importantes. La stabilité de ces dernières dans ce type de milieu poreux est peu connue. Ces mousses seront appliquées dans la partie amont de la zone de pollution. L'axe scientifique principal sera mis sur la formulation de mousses stables.
- Mousses de désorption/vectorisation : L'étude des effets désorbants/vectorisants des mousses sera divisée en deux parties.

1) Le premier axe portera sur le transport des polluants (sous forme dissoute ou concentrée voir par endroit pure) par injection de mousses.

2) Les polluants sous forme résiduelle seront traités lors de la seconde étape. Elle visera soit à extraire le trichlorobenzène par une utilisation des mousses en mode sparging pour accroître les rayons d'influence (le sparging sera associé à un venting), soit à utiliser des mousses pour améliorer la dispersion de fer et de charbon actif.

Le projet rassemble un industriel (Solvay, détenteur de la plateforme expérimentale et également producteur de tensioactifs/surfactants), des chercheurs et universitaires (Université de Bordeaux, UTINAM et BRGM) ainsi qu'une entreprise de dépollution (Serpil).

A l'issue des expérimentations, les plages d'applicabilité optimales des techniques seront déterminées (i.e. conditions dans lesquelles les techniques testées présentent un avantage significatif par rapport aux autres techniques existantes et matures sur le marché). Dans ce cadre, il sera établi un bilan des coûts des autres techniques matures (en investissement et en fonctionnement) ainsi que ceux des techniques testées dans le but de dégager une différence des coûts.

OPTIMEX

La dépollution in-situ des sols et des eaux souterraines par la méthode d'extraction multiphasique, désignée ici sous l'acronyme MPE (Multiphasic Extraction), admet des avantages économiques prouvés. Son principe de remédiation simultanée du sol et des eaux, la classe comme l'une des meilleures méthodes à utiliser dans le cas de pollution par les hydrocarbures et les COV avec une nappe d'eau peu profonde. Les difficultés dans l'application de cette méthode restent dans l'optimisation des conditions de traitement qui sont actuellement approchées à travers des méthodes empiriques. Des conditions d'application mal choisies engendrent des temps d'interventions plus importants et des dépenses énergétiques conséquentes.

L'objectif de ce projet est l'optimisation de la méthode MPE par identification des paramètres les plus influents sur le rendement de la dépollution. Ceci nécessite une modélisation physique et sa validation par l'expérimentation en laboratoire et les données de dépollution à l'échelle du terrain

Un modèle numérique décrivant l'écoulement et le transport durant la MPE a été développé par deux des partenaires. Cependant ce modèle ne prend pas en compte les phénomènes de biodégradation, d'adsorption-désorption et d'hystérésis. Ce modèle doit être développé afin de suivre l'évolution du polluant dans la zone saturée et la zone non saturée du sol.

Les expériences de laboratoire seront conduites dans des dispositifs à deux et trois dimensions. Elles consisteront à reproduire l'opération de dépollution MPE avec des capteurs placés à différents endroits des dispositifs permettant un suivi de l'évolution du polluant dans le sol. L'utilisation uniquement du dispositif 3D nous mettra face à un grand nombre de paramètres à identifier. Les résultats du dispositif 2D permettront de réduire ce nombre de paramètres.

Les sols choisis seront des sols reconstitués et un sol réel. La diversité de la composition des sols permettra d'identifier l'importance de l'influence de chaque propriété de sol sur les paramètres de la méthode. Ainsi des sols argileux permettront de voir l'impact sur le phénomène d'adsorption/désorption par rapport à un sol sableux. Un sol enrichi en biomasse permet de mieux voir l'effet de la biodégradation.

Les données issues de la dépollution d'un terrain permettront la validation finale du modèle. Enfin des tests de sensibilité et de robustesse du modèle seront menés afin d'identifier les paramètres d'optimisation de la MPE. Un Bilan Carbone® concernant le traitement in-situ par MPE viendra enrichir ce travail. Ce bilan carbone sera comparé à celui d'autres types de traitement si les données sont disponibles.

BIOTUBES

Aujourd'hui le sol est reconnu comme étant une composante majeure du fonctionnement des écosystèmes terrestres et un élément clé pour la fourniture de Services Ecosystémiques (SE) comprenant des services de support, d'approvisionnement, de régulation et des services culturels. Par ailleurs, l'évolution des activités humaines et notamment l'urbanisation, couplée à l'essor des considérations de santé, de sécurité et de salubrité ainsi qu'à la volonté de préserver les espaces naturels et agricoles, rend nécessaire la présence de nature en ville. De plus, la demande sociétale s'oriente vers la réintégration de la nature en ville. De ces constats a émergé l'idée de reconvertir ces terrains délaissés en espaces naturels afin de valoriser ces aires urbanisées dégradées tout en réintroduisant de la biodiversité en milieu urbain avec les différents SE associés (épuration de l'air, régulation du climat, réduction du bruit, drainage de l'eau pluviale, traitement des eaux usées ainsi que la valeur récréative et culturelle). La restauration de sites dégradés en zone urbaine ou périurbaine concourt à l'objectif de non dégradation de terrains agricoles ou forestiers en y limitant l'extension urbaine.

Le projet Bio-TUBES a pour ambition de répondre à ces enjeux liés la dégradation des sols en milieu urbain. En effet, un des verrous à la réussite des projets de réhabilitation écologique est lié à la difficulté de recréer des écosystèmes fonctionnels en partant d'un sol dégradé (compacté, stérile, imperméable). La PME Valorhiz (Jeune Entreprise Innovante, fondée en 2008), coordinatrice du projet, a développé une méthodologie de re-fonctionnalisation de sols stériles (type résidu miniers, gravières, talus) à travers la reconstruction physique des sols (bio-technosols), la réactivation des sols avec des solutions biologiques adaptées, l'ensemencement et la plantation d'espèces végétales locales. Cette approche se base en particulier sur l'Outil d'Aide à la Décision (OAD) TalVeg®, développé par Valorhiz, qui combine des bases de données (sols, climat, plantes, micro-organismes), des modèles du continuum sol-plante-atmosphère et des calculateurs de biodiversité afin d'optimiser la reconstruction d'écosystèmes fonctionnels optimisés.

Suite au succès de cette approche dans le contexte mines, carrières et talus de voies de communication, le projet Bio-TUBES a pour objectif de tester cette approche et la valider dans un contexte de friches industrielles urbaines à travers la mise en place et le suivi de deux sites pilotes (région parisienne et lyonnaise). En étroite interaction avec les gestionnaires de sites, les sols seront reconstruits, réactivés, ensemencés et replantés en début de projet puis suivis au cours du temps pour évaluer la re-fonctionnalisation biologique et la régénération des SE associés.

L'évaluation des solutions mises en œuvre se fera selon plusieurs axes : elle se focalisera sur les aspects technologiques, méthodologiques et écologiques mais abordera aussi les aspects réglementaires, économiques et sociétaux. Ainsi Valorhiz s'appuiera sur :

- le BRGM pour évaluer la re-fonctionnalisation microbiologique du sol (bioindicateurs de diversité et fonction des écosystèmes créés), réaliser une analyse réglementaire et évaluer les coûts les bénéfices (via la monétarisation des SE rendus),
- la PME ELISOL Environnement afin d'évaluer le retour précoce d'une faune du sol à travers le suivi d'indicateurs nématodes. Cela permettra à Elisol d'enrichir sa base de données nématofaunique (ELIPTO®) avec des mesures relatives aux sols urbains et aux espaces naturels.

Ce projet s'appliquera tout particulièrement à faire le lien entre recherche en connaissances nouvelles et appliquée et à développer et valider des méthodes adaptées aux collectivités territoriales et aux gestionnaires de sites afin d'encourager la mise en œuvre de ce type de technologie.

PIEGEACHLOR

La contamination des sols par des polluants organiques persistants (POP) peut générer des effets néfastes tant pour l'écosystème que pour l'Homme. S'agissant de molécules hautement rémanentes, le risque engendré est durable. La gestion s'avère dès lors indispensable et deux scénarios sont à distinguer. 1/ Les sites qui sont très pollués d'une surface assez faible, compatibles avec des actions de remédiation intensives ou des changements d'usage. 2/ Les sols pollués largement disséminés, couvrant des surfaces importantes et support d'usage établi. Pour cette deuxième catégorie, le postulat du projet est qu'une stratégie de séquestration in situ serait la plus efficace pour la restauration de ces sols dégradés.

Cette stratégie s'appuie sur le fait que ces polluants hydrophobes ont une forte affinité pour la Matière Organique (MO) du sol, au sein de laquelle ils se réfugient. Cet élément explique leur accumulation dans les horizons de surface tout en conservant une certaine biodisponibilité. Les POP peuvent donc avoir des effets néfastes, notamment sur le biote qui interagit avec la MO du sol ou par des transferts trophiques qui peuvent toucher des cibles plus distantes comme l'Homme notamment par la voie

alimentaire. L'hypothèse scientifique du projet est que l'utilisation d'une MO exogène plus condensée que la MO endogène permettrait d'établir un piégeage moins réversible de ces POP et donc de réduire leur biodisponibilité et leurs potentiels effets néfastes.

L'objectif du projet est d'acquérir des connaissances sur la capacité d'une gamme de MO condensées à séquestrer les POP présents dans les sols, ceci afin de pouvoir établir des scénarios de gestion de sols pollués notamment grâce à des approches de type risque résiduel. Pour pouvoir répondre à cette question, le projet s'intéresse à une gamme de MO condensée (du compost au Charbon Actif en passant par les biochars), une gamme de compartiments biotiques qui sont des cibles potentielles des effets néfastes (microorganismes, oligochètes du sol i.e., vers de terre et enchytréides, végétaux et poules) et à une gamme de POP aux propriétés physicochimiques contrastées. En effet, les acteurs du projet souhaitent garantir une certaine généralité de leurs résultats, ce qui passe par l'analyse du comportement d'un trio (polluant, cible, MO exogène). La combinaison proposée permet d'étudier des cas de figure contrastés et donc de proposer des interprétations qui dépassent les simples observations, sous forme de loi de réponse.

Le choix des différentes cibles biologiques comme celui des polluants sont argumentés, sur la base des interactions fines avec la MO, de leur pertinence et de leur représentativité.

Pour analyser ces interactions le projet s'articule en 3 étapes majeures. La première est basée sur la caractérisation de MO variées. La deuxième étape établira, à partir d'une sélection de ces MO, leur capacité à piéger le polluant (isothermes de sorption-désorption) vis à vis de cibles biologiques en utilisant des sols artificiels. Elle sera complétée par une extraction à l'aide d'un chélatant. La dernière étape est identique à la deuxième mais sera réalisée sur un nombre plus réduit de polluants et en utilisant un sol naturellement contaminé. La méthode utilisée est basée sur la réduction de la biodisponibilité, évaluée soit sur la base de concentrations dans le tissu cible, soit sur la base des effets.

Les résultats attendus sont une hiérarchisation de l'efficacité des MO condensées en fonction du POP. Cela inclut une estimation quantifiée de la réduction de la biodisponibilité obtenue. La spécification précise du matériau utilisé couplée à l'efficacité précédemment citée permettra d'établir un coût de gestion en fonction des objectifs à atteindre. L'entreprise CARBO FRANCE, partie prenante du projet, fabricante de charbon de bois, permettra d'envisager une application industrielle directe aux connaissances acquises.

MisChar

La requalification des espaces dégradés tels que les friches industrielles et les alentours de sites industriels est un enjeu majeur en termes de gestion des sites et sols pollués. Dans le cadre du renouvellement urbain, il s'agit d'une part, de limiter l'expansion des zones urbaines au détriment des espaces agricoles périurbains et d'autre part, d'assurer un développement qui s'inscrit dans le concept de « ville durable ». Aux alentours d'industries métallurgiques, la non-conformité de productions agricoles pour l'alimentation, du fait de valeurs excessives en éléments traces métalliques (ETM), amène la profession agricole à repenser les activités en valorisant leurs terres contaminées à des fins de productions non alimentaires.

Parmi les méthodes de requalification des sols pollués, le phytomanagement est adapté à de vastes surfaces et peut aussi constituer une solution transitoire sur des espaces à forte pression foncière. Malgré des retours d'expérimentations encourageants, ce mode de gestion reste encore émergent sur les marchés de la gestion et de la dépollution des sols. Dans ce contexte, le projet MisChar propose de mettre en place des dispositifs expérimentaux visant à étudier l'intérêt d'un charbon végétal (biochar) de miscanthus comme amendement pour (1) restaurer la fonctionnalité de sols urbains et agricoles affectés par les activités industrielles passées et (2) réduire durablement la mobilité et la biodisponibilité des ETM et des polluants organiques présents (phytostabilisation et phyto/rhizodégradation assistées). La démarche s'appuiera sur deux sites localisés au cœur de l'ancien bassin minier du Nord – Pas de Calais. Le premier, correspond à une friche industrielle, située au pied d'un terril minier, sur laquelle seront étudiés la végétation pionnière, une végétation semée et les effets des modes de gestion sur le comportement des polluants dans les sols amendés ou non. Le second site portera sur des parcelles agricoles du site atelier Metaleurop. Le chanvre industriel cultivé en rotation avec du blé sera le modèle végétal étudié. Seront plus spécifiquement évalués les effets du biochar sur le comportement et la santé des cultures.

Les objectifs du projet sont 1) d'acquérir des connaissances sur la viabilité écologique de modes de gestion de sols multicontaminés, urbains et agricoles, reposant sur l'amendement d'un biochar de miscanthus, 2) d'évaluer l'intérêt socio-économique des modes de gestion proposés au travers de leur

perception par les populations et les acteurs locaux, 3) de développer des compétences et des filières de valorisation de ces espaces dégradés en réponse aux attentes des populations concernées et des acteurs économiques et 4) de mettre en place des démonstrateurs pour mieux connaître et promouvoir les modes de gestion des sols multicontaminés auprès des acteurs des territoires concernés.

La démarche, qui implique un partenariat pluridisciplinaire, s'inscrit dans le cadre d'une économie circulaire avec pour objectifs :

- de soutenir la production de miscanthus, plante connue pour son aptitude à la phytostabilisation des ETM et ceci, en proposant une nouvelle filière au travers du biochar ;
- de valoriser ce biochar pour améliorer les potentialités agronomiques de sols, agricoles et urbains, multicontaminés et contribuer à limiter les dangers environnementaux et sanitaires ;
- de contribuer à la requalification d'espaces urbains dégradés par les activités industrielles passées et répondre à de nouvelles attentes environnementales (revégétalisation, continuité écologique, stockage du carbone, réduction des îlots de chaleurs, infiltration des eaux pluviales...), sociétales (besoins d'espaces verts, réappropriation par les populations d'espaces dégradés...) et économiques;
- d'évaluer une nouvelle filière sur le site atelier Metaleurop, depuis la culture du chanvre industriel jusqu'à la commercialisation des fibres.

APR GESIPOL – 4e édition 2017 – liste des projets lauréats

La quatrième édition de l'APR GESIPOL vise les 2 axes thématiques complémentaires :

- Axe 1 : améliorer les modalités de dimensionnement et pilotage des traitements et d'évaluation des performances
- Axe 2 : innover et améliorer les techniques de traitement appliquées aux sols et aux eaux souterraines

Au terme du processus de sélection de l'édition 2017, 3 projets ont été sélectionnés en liste principale pour une aide ADEME d'environ 1 M€.

Liste des projets retenus en 2018 pour une aide de l'ADEME suite à l'APR GESIPOL – liste principale

Acronyme	Contenu du projet	Coordinateur, partenaires
COMPAs	Combinaison de techniques de (bio)-traitement passives ou semi-passives applicables aux drainages miniers acides arséniés	BRGM, CNRS, ARMINES – Mines d'Alès et Mines Paris, BURGEAP
BIO & BIO	Optimisation des techniques du biolavage pour atteindre les hydrocarbures peu biodisponibles	Golder Associates, SOLEO SERVICES, Université de Lorraine, SNCF
PAPIRUS	Pompage Assisté par Puits Inclinés avec Récupération par Upwelling et injection de Stabilisants	SERPOL, BRGM, INOVYN, UTINAM, INTERA, GENDRY SERVICE LOCATION

COMPAs

Les drainages acides liés à la réalisation d'anciens travaux miniers représentent une source de pollution par des substances inorganiques toxiques. Il est en général très difficile de stopper ou de réduire ces drainages qui doivent être traités en continu sur une durée indéterminée. Le coût des procédés de traitement actifs classiques représente une charge importante pour la société. La mise au point de procédés peu coûteux en énergie et en réactifs chimiques, nécessitant peu d'intervention humaine et produisant le moins de déchets possible, représente donc un enjeu majeur pour la gestion à long terme des districts miniers. Le projet COMPAs a pour objectif d'optimiser, en conditions réelles sur site, la combinaison optimale d'étapes de traitement passives ou semi-passives permettant de réduire l'impact environnemental de drainages miniers acides riches en fer, en métaux lourds et en arsenic. Les deux principales étapes du traitement biologique sont complémentaires : (1) la sulfato-réduction, permettant d'éliminer sous forme de sulfures, les métaux qui ne sont pas éliminés par les autres étapes de traitement et (2) la bio-oxydation induisant une co-précipitation de fer et d'arsenic. Ces étapes ont déjà fait l'objet de travaux de recherche et d'optimisation au laboratoire et jusqu'au prototype sur site pour la bio-oxydation. Cependant, elles n'ont pas été combinées in situ et ne permettent pas l'augmentation du pH indispensable pour conférer à l'eau traitée une qualité compatible avec un rejet dans l'environnement. Les étapes biologiques doivent donc être combinées entre elles et complétées par un procédé passif physico-chimique alcalin permettant leur neutralisation. Le projet COMPAs propose de comparer différents scénarios de traitement, combinant les étapes biologiques précédemment étudiées, mais nécessitant des extrapolations et optimisations sur site, et une étape de neutralisation par contact avec des matériaux calcaires. Deux modes seront envisagés : (i) le mode extensif, dans une zone étendue tirant parti de la topographie naturelle en aval d'un site, (ii) le mode compact dans l'espace compact d'une station de traitement classique. Le projet intégrera des approches de modélisation et de conception en ingénierie associées à des expériences sur site, incluant des pilotes de réacteurs biologiques, ainsi qu'un programme de tests au laboratoire pour les drains calcaires. Les objectifs du projet seront atteints sur la base d'avancées scientifiques dans le domaine de la mise en relation de l'activité des communautés bactériennes dans les bioréacteurs avec les paramètres imposés par le fonctionnement en conditions réelles sur site, et de l'optimisation basée sur la modélisation numérique.

Les avancées techniques porteront principalement sur le changement d'échelle pour la sulfato-réduction et sur la combinaison support bactérien/mode d'oxygénation pour l'étape de bio-oxydation. Le projet bénéficiera d'une part d'une grande connaissance du site sur lequel les travaux seront réalisés par les partenaires du projet et d'autre part de l'expertise solide de ces derniers dans le domaine de l'environnement minier, mais dans des disciplines complémentaires (géochimie, microbiologie, génie des procédés, modélisation, extrapolation de procédés de bioremédiation, mise en oeuvre sur site). Les résultats attendus à l'issue du projet consisteront en un ensemble de caractéristiques des différentes étapes, passives ou semi-passives, du schéma global des deux types de dispositifs de traitement, le premier extensif et le second compact. Le projet COMPAs s'inscrit dans le contexte territorial du district minier de Carnoulès, mais vise également à acquérir des connaissances et des règles d'extrapolation applicables sur différents sites.

Il participera à la mise à disposition de la société de systèmes de traitement passifs pour des DMA riches en métaux et métalloïdes tels que l'arsenic. Ces dispositifs de traitement passifs généreront des bénéfices environnementaux et économiques au niveau d'anciens sites miniers pour lesquels il est nécessaire de contrôler et traiter les exhaures avant leur rejet dans l'environnement.

BIO & BIO

Le projet BIO&BIO, pour BIODISPONIBILITE et BIOLAVAGE est un projet multidisciplinaire aux objectifs ambitieux cherchant à répondre à deux problématiques majeures du diagnostic des sites pollués et de leur traitement in situ. Ce projet a obtenu la labellisation Axelera.

Le projet BIO&BIO cherche tout d'abord à développer un nouveau protocole de mesure de la biodisponibilité des hydrocarbures dans les sols pollués et ce, afin d'améliorer l'évaluation de la faisabilité du traitement de ces sites par des techniques biologiques in situ. Le protocole développé sera ainsi utilisé pour trouver les moyens de modifier cette biodisponibilité, paramètre souvent limitant la faisabilité des traitements.

Le projet BIO&BIO a également pour objectif d'optimiser les techniques de traitement par biolavage et ce, en recherchant les modalités permettant une augmentation significative de la biodisponibilité des hydrocarbures, permettant ainsi une amélioration des cinétiques de biodégradation et de récupération par lessivage.

Le projet explorera tout d'abord l'optimisation du traitement par le biais de processus biologiques via l'injection de cultures de micro-organismes hydrocarbonoclastes. Le projet étudiera également la modification des paramètres chimiques régissant les forces de sorption par l'utilisation de biosurfactants produits dans des cultures microbiennes dédiées. Le projet explorera enfin des méthodes convectives (eau à différentes températures) dans ce même objectif de favoriser la désorption depuis la matrice solide des sols vers la matrice liquide.

Les différentes modalités explorées durant le projet BIO&BIO seront étudiées au laboratoire dans des essais en colonne afin d'aboutir à une compréhension maximale des processus mis en jeu. Un suivi précis des effets des différentes modalités sur la biodisponibilité des hydrocarbures et sur les micro-organismes du sol sera réalisé.

Les modalités ou couplage de modalités, définis comme étant efficace pour mobiliser ou permettre la biodégradation des hydrocarbures seront testés lors d'un essai pilote sur un sol modèle (contamination vieillie, faible biodisponibilité des hydrocarbures, teneur élevées). Cet essai pilote permettra une optimisation du traitement par lessivage en développant les outils technologiques adéquat (matériel grande échelle de culture microbienne et de suivi de la densité bactérienne, matériel d'injection de produit).

Afin d'atteindre les objectifs de ce projet, le groupement s'articule autour d'acteurs reconnus des sites et sols pollués depuis la maîtrise d'ouvrage (SNCF) jusqu'à la réalisation des travaux (SOLEO Services) en passant par la phase d'étude (Golder Associates) et la recherche universitaire (Laboratoire Sols et Environnement).

PAPIRUS

Le projet PAPIRUS (Pompage Assisté par Puits Inclinés avec Récupération par Upwelling et injection de Stabilisants) a pour objectif d'optimiser l'extraction et la stabilisation de DNAPL impactant le milieu souterrain. Trois axes de recherche comprenant des essais au laboratoire, des modélisations multiphasiques et des essais pilote sur site sont proposés pour répondre à l'objectif fixé.

La réalisation d'un forage dirigé dans la partie basale de l'aquifère destiné à relier plusieurs zones d'accumulation permettra d'améliorer substantiellement le rayon d'action de pompage et le rapport volume de DNAPL extrait/coûts de forage. En effet, l'éparpillement et la complexité des zones d'accumulation de DNAPL au fond de l'aquifère limite souvent la capacité d'extraction à partir d'ouvrages verticaux ponctuels en raison de la juxtaposition de cuvettes déconnectées contenant le DNAPL.

Un pompage par upwelling (technique de pompage des eaux souterraines non impactées au-dessus du DNAPL, validée dans le projet SILPHES) permettra d'augmenter la zone de capture du DNAPL. Les

eaux pompées seront réinjectées de manière centripète, via des piézomètres, en périphérie de la zone source. Par la suite, une partie des eaux pompées fera l'objet d'ajouts de formulations ad hoc de composés chimiques, dont les propriétés spécifiques permettront séquentiellement de :

- bloquer la zone de perméabilité la plus importante (sables graveleux) afin de privilégier le traitement de la saturation résiduelle dans les zones les moins perméables (sables fins). Pour favoriser la création de cette zone précontrainte, les formulations seront à base de liquides bloquants (gel et/ou mousse) ;
- diminuer les saturations résiduelles contenues dans les sables fins en mobilisant les polluants vers le drain sans dissoudre les DNAPL. Il s'agira donc de se placer sous les Concentrations Micellaires Critiques (CMC) des formulations utilisées. Les formulations mises au point permettront de balayer la zone des sables fins de manière homogène en limitant les phénomènes de digitation et de piégeage du DNAPL résiduel dans les dénivelés du substratum. Ces formulations, aux propriétés rhéologiques spécifiques, seront de type mousses et/ou gels ;
- bloquer le phénomène de rétrodiffusion de DNAPL issus des argiles (formant le substratum). Il s'agira de tapisser le fond de l'aquifère par ajout d'un gel de vectorisation à base de Fe zérovalent et/ou de charbon actif.

La mise au point de cette approche innovante reposera sur l'acquisition de données expérimentales de laboratoires qui permettront d'alimenter les modélisations multiphasiques. Ces modélisations à l'aide d'outils multiphasiques permettront de dimensionner les ouvrages d'injections et de récupération de produits purs mais également d'estimer les gains attendus par rapport à un traitement classique. Ce travail alimentera par conséquent les réflexions finales relatives aux analyses technico-économiques. L'ensemble des expérimentations au laboratoire et sur le terrain sera suivi par méthodes géophysiques. Il s'agit (i) d'améliorer, la connaissance de la topographie du substratum et plus particulièrement les points altimétriques bas où le DNAPL est susceptible de s'accumuler, (ii) de quantifier les saturations résiduelles in situ et d'ajuster au mieux le traitement.

PAPIRUS a donc pour finalité de valider un scénario itératif de gestion de la pollution en DNAPL grâce à la succession de traitements physiques et chimiques complémentaires et innovants. PAPIRUS s'appuiera sur les dernières avancées dans le domaine de la recherche en sites et sols pollués avec comme objectif une diminution forte et homogène des saturations résiduelles et une diminution conséquente des relargages de polluants dans la phase dissoute qui constituent souvent un frein à l'atteinte du bon état de qualité des masses d'eaux souterraines.

Le procédé optimisé fera l'objet d'une démonstration sur le site de l'usine INOVYN de Tavaux.

Le projet rassemble un industriel (INOVYN, exploitant du site d'étude), des chercheurs et universitaires (UTINAM, BRGM), un bureau d'études spécialisé en modélisation hydrogéologique (INTERA), une société spécialisée dans les forages dirigés (GENDRY SERVICE LOCATION), ainsi qu'une société de travaux de dépollution (SERPOL).

Liste des projets retenus en 2018 pour une aide de l'ADEME suite à l'APR GESIPOL – liste complémentaire. La contractualisation de ces projets est susceptible de ne pas aboutir.

Acronyme	Contenu du projet	Coordinateur, partenaires
MONIC	MONItoring des gaz et des Contaminants organiques de sites pollués en cours de remédiation	Université de Lorraine (UMR LIEC, UMR GeoRessources, UMS Otelo, UMR LSE), Element-terre-solutions, BRGM
SOBIOVE	Sécurisation des Opérations de BioVenting par Evaluation des cinétiques d'échanges et de biodégradation	BURGEAP, CEBTP, IMFT, LHYGES, VALGO
DEPOLOND	DEsorption thermique in-situ des sols POLLués par les hydrocarbures pétroliers en utilisant l'énergie micro-ONDes	EDF, Université de Lorraine (UMR LIEC, UMR Géorressources), BRGM, SUEZ Remediation, SAIREM