

L'ingénierie écologique au service de la réhabilitation des sites naturels impactés par des accidents technologiques

Le cas de la fuite d'hydrocarbures de l'oléoduc SPSE dans la Réserve naturelle nationale des Coussouls de Crau

1. Contexte de la recherche (une page)

L'ingénierie écologique peut être comprise comme étant l'application des principes de l'écologie à la gestion de l'environnement. Elle peut se définir de deux manières. Au sens strict, c'est la manipulation *in situ* de systèmes écologiques dans un contexte écosystémique explicite. Au sens large, l'ingénierie écologique désigne la gestion de milieux et la conception d'aménagements durables, adaptatifs, multifonctionnels, inspirés de, ou basés sur, les mécanismes qui gouvernent les systèmes écologiques. Les objectifs de l'ingénierie écologique sont donc notamment (1) la réhabilitation d'écosystèmes dégradés, la restauration de communautés, la réintroduction d'espèces (2), la création de nouveaux écosystèmes durables qui ont une valeur pour l'homme et pour la biosphère et (3), la mise au point d'outils biologiques pour résoudre ou prévenir des problèmes de pollution, maintenir, rétablir ou maximiser un service éco-systémique.

L'ingénierie écologique se déploie ainsi dans un champ scientifique et technique extrêmement diversifié, en évolution rapide, qui concerne une large gamme de problématiques relatives à l'environnement et au développement durable. Elle renvoie aux sciences et techniques de l'ingénieur mobilisées pour l'évaluation des ressources, pour la prévention des catastrophes naturelles et technologiques ainsi que l'atténuation de leurs effets. C'est dans ce contexte que va être mis en place un partenariat entre l'UMR 6116 CNRS/IRD IMEP et le l'UMR CNRS 6264 Laboratoire Chimie Provence (LCP) pour expérimenter de nouvelles techniques de réhabilitation écologique faisant appel à l'ingénierie écologique suite à la réhabilitation du chantier de dépollution de la fuite d'hydrocarbures survenue au cœur de la Réserve naturelle des coussouls de Crau le 07 août 2009.

En effet, suite à cet accident, un comité de suivi, convoqué par le Préfet du département des Bouches-du-Rhône, a été mis en place. Les principaux scientifiques qui ont participé à ce comité tout le long de l'année 2010 sont : 1) T. Dutoit, président du conseil scientifique de la Réserve de la Crau et spécialiste de réhabilitation des écosystèmes, et 2) P. Höhener, expert désigné par le Préfet via la police de l'eau comme spécialiste en ce qui concerne la pollution chimique de la nappe et la remédiation. Les travaux nécessaires sur ce site pour sa réhabilitation future ont été évoquées récemment dans les médias régionaux (La Marseillaise, 31 janvier 2011 ; La Provence, 6. Février 2011, France 3 19/20, 11 février 2011). Le chiffre de 50 millions d'Euros pour une durée de trente années est ainsi évoqué comme coût global de cette réhabilitation. Malgré certaines divergences, les différents acteurs représentés dans le comité de suivi ont finalement opté fin 2010 pour un programme de réhabilitation des sols de surface et de

Dutoit T. (IMEP) et Höhener P. (LCP). L'ingénierie écologique au service de la réhabilitation des sites naturels impactés par des accidents technologiques

la nappe phréatique avec des techniques incluant des suivis expérimentaux relevant du domaine de l'ingénierie écologique. Il nous semble alors important de proposer un programme de recherche associé à cette opération de réhabilitation unique en France, avec une collaboration entre nos deux laboratoires et de solliciter une aide d'Eccorev pour préparer au mieux un tel projet dans le cadre d'une ANR (Ecotech).

2. Objectifs de la demande (maximum une page) incluant la description de la suite prévue pour le projet

L'objectif de la présente demande est de regrouper les compétences de l'IMEP et du laboratoire Chimie Provence pour expérimenter de nouvelles techniques complémentaires en ingénierie écologique afin d'atténuer l'impact d'accidents technologiques sur les espaces naturels et leur nappe phréatique avec notamment :

1. des expérimentations de transfert de sol (en vrac, en plaques) et de foins associées à différentes modalités de restauration du sol (composition, organisation) pour accélérer la réhabilitation de la végétation typique des pseudo-steppes méditerranéennes (avec inoculation de champignons mycorhiziens, etc.) et des différentes fonctions des sols reconstitués via la restauration de la vie microbienne, mycologique et de la macrofaune (IMEP).
2. des expérimentations de stimulation de la biodégradation du pétrole brut dans la nappe de la Crau, afin d'accélérer sa biodégradation et donc de diminuer le temps d'incidence sur l'eau de la pollution ainsi que la surveillance de la nappe (LCP).

Le site atelier et le modèle choisi correspondent au chantier de dépollution de la fuite d'hydrocarbures de l'oléoduc SPSE survenue le 07 août 2009 et ayant déversé 4700 m³ de pétrole brut conduisant à la destruction de plus 5 ha de la végétation pseudo-steppique de la plaine de Crau, écosystème protégé car unique au monde (présence d'une avifaune et entomofaune endémique). La pollution concerne également la nappe phréatique impactée pour une durée estimée à plus de trente années. Le projet se fera en partenariat avec les différents intervenants sur ce chantier (Société du Pipeline Sud-Européen SPSE, Naturalia Environnement, ICP Environnement, CEEP-Ecomusée de Crau, RNNCC, Chambre d'agriculture 13, Conseil Général 13, Région PACA, Syndicat Mixte pour la Nappe de la Crau SYMCRAU, etc...)

La suite prévue à cette collaboration est notamment la construction d'une réponse commune à l'appel d'offres ANR « ECOTECH », programme production durable et technologies de l'Environnement. En effet un des axes de cet appel d'offres de l'ANR concerne « *la conception de systèmes de traitement intégrant l'ingénierie écologique, au sens d'aménagements ou de gestion durables adaptatifs, multifonctionnels, basés sur les mécanismes qui gouvernent les écosystèmes naturels. Il s'agit ainsi de dépasser l'empirisme pour fonder l'ingénierie des pratiques en fort développement sur un corpus théorique* ».

3. Réalisations prévues, plan financier succinct (une à deux pages), description courte du mode d'interaction prévu entre les équipes.

Suite au chantier de réhabilitation en cours entre février 2011 et mars 2011, des protocoles scientifiques de suivis de différentes techniques de restauration relevant de l'ingénierie écologique seront testés, dont différentes méthodologies de remise en place des sols selon des profondeurs différentes (> 40, 20-40 cm, 0-20 cm) afin de tester une économie dans l'utilisation des ressources naturelles. Seront également testés différents traitements de forçage des processus de dispersion des espèces typiques de la pseudo-steppe afin d'en accélérer la restauration (transfert de foin, transfert direct de plaques de sol selon différentes modalités de tailles et de disposition spatiale, etc.).

En 2011 seront mis en place le protocole expérimental et les analyses physico-chimiques et microbiologiques des sols au temps t0 (sol de la steppe de référence, sol de la steppe transférée, sol du cailloutis de Crau < 40 cm, sol de la couche 20-40 cm, sol de la couche 0-20 cm). Au niveau de la végétation, seront matérialisés :

- 10 quadrats (10 x 10 m) témoins sur la steppe
- 10 quadrats sur les zones non réhabilitées et comprenant seulement du cailloutis de Crau
- 20 quadrats sur les zones réhabilitées avec les couches 20-40 cm et 0-20 cm avec ou sans compactage final (10 x 2)
- 10 quadrats sur les zones réhabilitées avec la couche 20 - 40 cm seulement
- 10 quadrats sur les zones réhabilitées avec la couche 0 - 20 cm seulement.
- 60 quadrats (5 x 5 m) avec transferts de foin (500g/m²) selon les différentes modalités de remise en place du sol
- 60 quadrats (5 x 5 m) avec transferts de 5 plaques de sol (50 x 50 x 10 cm) pour tester directement la greffe et l'effet nucléus. De même seront suivis sur le lieu de prélèvement des plaques (carrière de la Ménudelle) la cicatrisation là où les plaques auront été prélevées.

Pour consulter la mise en place des quadrats et le protocole de restauration, visionner le reportage de France 3 du 19/20 du 11 février 2011 (2'23"), taper Crau dans la recherche puis sélectionner le film « *La Crau : travaux sur le pipeline* ».

http://info.francetelevisions.fr/video-info/index-fr.php?id-categorie=JOURNAUX_LES_EDITIONS_REGIONALES_PROVENCE_ALPES_1920

Suite à la mise en place des différents traitements, d'autres expérimentations plus fines viendront compléter les suivis, notamment le test de l'inoculation de mycorhizes dans les différents sols et de la réintroduction de certains ingénieurs de l'écosystème (vers de terre, fourmis) en fonction de la résilience naturelle mesurée en 2011 après la mise en place des différentes couches de sol.

Ces différentes expérimentations devraient apporter des informations majeures sur les verrous ou seuils d'irréversibilité à franchir pour accélérer la restauration de communautés végétales matures (pseudo-steppe de la Crau) à forte valeur patrimoniale. Notamment en économisant dans un premier temps les ressources utilisées (sol) et en innovant sur les techniques permettant un retour rapide des diverses

fonctionnalités du sol pour accélérer la structuration des communautés végétales et animales. Cet aspect constitue en effet un front de sciences car aucune technique ne permet pour l'instant de mimer les interactions entre le sol, le climat et le régime de perturbation (pâturage ovin) qui ont permis l'existence depuis plus de 6000 ans de la végétation si originale de la pseudo-steppe de Crau.

En ce qui concerne la réhabilitation de la nappe de la Crau, la grande question actuelle concerne la capacité naturelle du site pour la biodégradation du pétrole. En effet, cette capacité d'atténuation de la pollution est-elle suffisante pour que la cible la plus proche, un puits d'eau dans une bergerie en aval du site, ne soit pas impactée ? En effet, les travaux de caractérisation du site en 2010 ont mis en évidence une certaine capacité d'atténuation naturelle par les microorganismes de la nappe, qui a permis de confiner le panache de pollution à proximité du lieu de l'accident. Cette capacité est désormais relativement fragile et la question concernant la stimulation de cette biodégradation a été évoquée. L'idée est donc d'injecter des nutriments dans la nappe qui se trouve à 10 m de profondeur sous cet écosystème dont le sol et le sous-sol sont naturellement pauvres en nutriments. Pour évaluer le bénéfice d'une telle opération, des expériences en laboratoire et sur le terrain semblent être nécessaires. Les hydrogéologues du bureau mandaté par la société SPSE proposent d'effectuer quelques tests de stimulation sur le terrain. Mais celles-ci sont cependant limitées : on ne peut en effet tester une multitude de combinaisons de facteurs. C'est pourquoi dans le cadre ce projet Eccorev, nous proposons des expérimentations multiparamétriques en laboratoire afin de mieux comprendre les mécanismes à la base des techniques d'ingénierie écologique. Une étude multiparamétrique est ainsi prévue pour déterminer les facteurs limitant la cinétique de la biodégradation du pétrole. L'objectif est donc d'étudier la diversité et la biomasse de la flore bactérienne naturelle dans un sédiment de la nappe prise à un endroit où la biodégradation a déjà commencé. Parmi ces facteurs, nous proposons de tester : la disponibilité des accepteurs d'électrons (oxydants, entre autre oxygène, nitrate, oxyde de manganèse, oxyde de fer, sulfate) ; la disponibilité des nutriments (différentes formes d'azote et de phosphore), et la température. Cela donnera non seulement une idée plus claire sur les facteurs limitant la biodégradation du pétrole, mais permettra aussi de quantifier les cinétiques de dégradation, qui sont des paramètres clés dans les modèles de propagation temporelle et spatiale de la pollution.

L'objectif final visé est donc un traitement biologique de la nappe qui serait suffisamment robuste pour confiner le panache de pollution sans atteinte nuisible en aval du site. Ce traitement s'insère dans un cadre de développement durable car il évite ainsi les techniques d'ingénierie classique telles que l'excavation et la mise en décharge ou la mise en incinération du sol (qui serait ainsi perdu), ou l'immobilisation du polluant par des produits géotechniques (qui obstrueraient alors l'écoulement naturelle de la nappe), ou encore la destruction du polluant par des oxydants chimiques (qui détruisent aussi la flore microbienne de la nappe). Le porteur de ce volet du projet (P. Höhener) est idéalement placé pour ces types de recherches car il a déjà participé à plusieurs projets visant à réhabiliter des nappes phréatiques impactées par des produits pétroliers, mais néanmoins à des échelles plus petites que celles de la nappe de la Crau. Les résultats des travaux sur la Crau permettront un meilleur « *upscaling* » et auront grâce à cela une

Dutoit T. (IMEP) et Höhener P. (LCP). L'ingénierie écologique au service de la réhabilitation des sites naturels impactés par des accidents technologiques

très grande visibilité internationale. Les expériences seront faites en incubant en microcosmes (flacons d'environ 100 ml) le sédiment pris dans la nappe lors des forages prévus pour mars-avril 2011, l'eau de la nappe qui peut être prise à tout moment et le pétrole qui est écrémé en continu sur site. Pour les microcosmes en aérobie, le gaz de tête sera l'oxygène ; pour les microcosmes en anaérobie, ce serait l'azote. L'incubation des microcosmes se fera à 20 °C immergé dans un bain d'eau sans oxygène pour éviter l'entrée d'oxygène dans les flacons. Les facteurs stimulants testés seront: la concentration d'accepteurs d'électrons (oxygène, nitrate, sulfate), la concentration d'une source supplémentaire d'azote (NH_4^+) et la concentration de phosphates. La dégradation du pétrole sera suivie par un bilan carbone, en mesurant la production de CO_2 , le carbone inorganique dissout et le CH_4 en fonction du temps. La consommation des accepteurs d'électrons et la formation des produits réduits (Mn^{2+} , Fe^{2+}) seront suivies. La composition initiale et finale du pétrole sera aussi analysée.

Plan financier succinct :

IMEP (2011)

- Mise en place des différentes expérimentations complémentaires (transfert de plaques, inoculation des mycorhizes, location véhicule avec benne basculante, achat des souches, aspiration et épandage du foin) : 2000 €
- Déplacements terrain (mise en place des expérimentations + suivis) : 1000 €
- Déplacements réunions avec les différents partenaires pour réponse à ANR Ecotech dont réunion à l'étranger (Belgique, Allemagne) : 1000 €

Laboratoire Chimie Provence (2011)

- Expériences portant sur la stimulation de la biodégradation du pétrole (Consommables laboratoire, achat colonnes, coût analytique avec COT mètre et HPIC pour nitrates, phosphates, analyses Fe et Mn) : 1400€
- rémunération stagiaire Master 2 (5 mois à 420 euros): 2100 €
- Déplacements terrain: 500 €
- Déplacements réunions avec les différents partenaires pour réponse à ANR Ecotech dont réunion à l'étranger (Belgique, Allemagne) : 1000 €

4. Description du consortium : liste des participants (avec leur statut et le pourcentage d'implication),

Participants IMEP:

- Dr. Thierry Dutoit (professeur, coordination, 30%)
- M^{elle} Noëlie Fonvieille (MASTER 2, Microbiologie, Mycorhizes, 50%)
- M. Renaud Jaunâtre (Doctorant, écologie végétale, 20%).
- M. Jean-François Alignan (Doctorant, écologie animale du sol, 20%).

Participants Laboratoire Chimie Provence

- Dr. Patrick Höhener (professeur, coordination, 30%)
- Dr. Pascale Prudent (MCF, chimie analytique 20%)
- Carine Demelas (Technicienne, 10 ou 20%)
- XX ou XY (Stagiaire Master 2, futur doctorant)

5. Court CV du porteur de chaque équipe

Pr. Dr. Dutoit Thierry (Directeur adjoint UMR CNRS-IRD 6116 IMEP)

2003 : Professeur d'université (CNU 68), Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse

2001 : Thèse d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Provence

1996 : Maître de Conférences, Université de Provence

1995 : Thèse de Doctorat, Université de Rouen.

Les **objectifs principaux** de mes travaux sont de mieux comprendre comment les activités humaines récentes et passées ont modifié notre environnement. Nos résultats sont ensuite appliqués à la restauration ou « renaturation » des écosystèmes grâce à des techniques novatrices et expérimentales relevant de l'écologie de la restauration encore appelée « ingénierie écologique » et faisant appel aux **interactions biotiques** entre espèces. L'écologie de la restauration est une discipline scientifique apparue dans les années 1980. Ses objectifs sont de « réparer » les écosystèmes détruits ou partiellement détruits par les activités humaines afin de restaurer la diversité biologique et les fonctions de l'écosystème « naturel » préexistant. Après avoir décrit les impacts anthropiques et leurs conséquences sur la végétation et leur entomofaune associée, nous réalisons des expérimentations "*in situ*" afin de restaurer ces espaces et d'en tirer des conclusions au niveau de la recherche fondamentale en écologie des communautés (définition des règles d'assemblage).

J'ai publié à ce jour 50 articles internationaux de rang A et indexés depuis 1995 (facteur H = 11, plus de 450 citations au total). Depuis 1996, j'ai co-encadré 9 thèses de Doctorat soutenues dont sept en tant que directeur principal depuis l'obtention de ma thèse HDR en 2001. Actuellement, j'encadre six thèses en tant que directeur principal à des degrés divers selon les codirections établies. Tous les étudiants que j'ai co-encadrés en thèse (9) et qui se sont présentés à la qualification aux fonctions de maître de conférences ont obtenu cette qualification dans les sections 68 et/ou 67 et/ou 24. En Dutoit T. (IMEP) et Höhener P. (LCP). *L'ingénierie écologique au service de la réhabilitation des sites naturels impactés par des accidents technologiques*

2010, j'ai été élu au conseil scientifique de l'INEE et élu entre 2006 et 2010 au conseil d'administration de l'association internationale d'écologie de la restauration, section Europe. J'ai notamment organisé deux colloques nationaux dans les locaux de l'IUT d'Avignon (ECOVEG2 et Rever 1). La reconnaissance internationale de mon activité scientifique s'est notamment traduite par l'organisation pour la première fois en France du 23 au 27 août 2010, du 7^{ème} congrès européen d'écologie de la restauration (450 participants). En outre, j'ai été invité à 8 colloques internationaux, 11 nationaux et j'ai enfin participé à 17 comités scientifiques ou d'organisations de colloques nationaux (11) et internationaux (7).

Römermann C., **Dutoit T.**, Poschlod P. & Buisson E., 2005. Influence of former cultivation on the unique Mediterranean steppe of France and consequences for conservation management. *Biological Conservation*, 121 : 21-33. (**CI₂₀₀₉ = 3.167**).

Buisson E., **Dutoit T.**, Torre F., Römermann C., Poschlod P., 2006. The implications of seed rain and seed bank patterns for plant succession at the edges of abandoned fields in Mediterranean landscapes. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 115 : 6-14. (**CI₂₀₀₉ = 3.130**)

Coiffait C., Buisson C., **Dutoit T.** 2011. Hay transfer promotes establishment of Mediterranean steppe vegetation on soils disturbed by pipeline construction. *Restoration Ecology* (in press) (**CI₂₀₀₉ = 1.665**).

Pr. Dr. Höhener Patrick (LCP, UMR 6264, Université de Provence)

2005 : Professeur d'université (CNU 35), Université de Provence

1998 : Chercheur senior, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

1991 : Maître de Conférences, Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich

1990 : Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich

Le thème central de mes recherches passées et présentes concerne l'étude du comportement des polluants dans les milieux pollués, en particulier dans les sols et les nappes phréatiques. Les polluants incluent des composés chimiques utilisés à grande échelle (dérivés du pétrole, additifs d'essence). Cela a impliqué et implique un travail à différentes échelles spatiales et de temps, du bassin versant à l'échelle microscopique, d'études ponctuelles à des cycles d'observation de plusieurs années. Les principaux buts de ces travaux portent sur 4 aspects : 1) l'acquisition d'une connaissance approfondie du transport et du comportement des composés dans différents contextes hydro-chimiques et hydrogéologiques, 2) l'évaluation du risque encouru par l'Homme et les eaux souterraines dans l'éventualité d'une augmentation de la charge polluante, 3) le développement de nouvelles techniques d'investigation et de monitoring (notamment par les isotopes stables), et enfin 4) le choix, le test et l'application de techniques de remédiation afin de réduire le risque.

J'ai publié plus de 50 articles scientifiques dans des revues de rang A. Mes travaux ont été cités plus de mille fois au total (ISI Web of Knowledge). Mon facteur H est de 18. J'ai été nommé expert indépendant par le Préfet des Bouches-du-Rhône pour le cas de l'accident pétrolier en Crau, et j'ai été nommé expert scientifique par l'ADEME pour le projet scientifique pluriannuel ATTENA (Atténuation naturelle des polluants aux sites

contaminés). Je suis membre du comité éditorial de la revue *Journal of Contaminant Hydrology* (Elsevier).

Höhener, P., et Atteia, O. (2010). Multidimensional analytical models for isotope ratios in groundwater pollutant plumes of organic contaminants undergoing different biodegradation kinetics. *Advances in Water Resources* 33, 740-751 (**CI₂₀₀₉ = 2,345**).

Atteia, O., et Höhener, P. (2010). Semi-analytical model predicting transfer of volatile pollutants from groundwater to soil surface. *Environmental Science & Technology* 44, 6228–6232 (**CI₂₀₀₉ = 4,69**).

Kaufmann, K., Chapman, S.J., Campbell, C.D., Harms, H., et Höhener, P. (2006). Miniaturized test system for soil respiration induced by volatile pollutants. *Environmental Pollution* 140, 269-278 (**CI₂₀₀₉ = 3,426**).