

L'ingénierie écologique au service de la réhabilitation des sites naturels impactés par un accident technologique: le cas de la fuite d'hydrocarbures de l'oléoduc SPSE dans la Réserve naturelle nationale des Coussouls de Crau

Thierry Dutoit⁽¹⁾ et Patrick Höhener⁽²⁾

⁽¹⁾ UMR CNRS-IRD IMBE, UAPV-AMU, FR ECCOREV

⁽²⁾ UMR CNRS LCE, AMU, FR ECCOREV

Introduction

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 éco-systémique 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 qu'a été mis en place un partenariat entre l'UMR CNRS-IRD IMBE et l'UMR CNRS LCE 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.

Les objectifs du programme ayant fait l'objet d'une demande de soutien à la FR ECCOREV en 2011 était de regrouper les compétences de l'IMBE et du LCE 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 associées à différentes modalités de restauration du sol (composition, organisation) pour accélérer la réhabilitation de la végétation typique des pseudo-steppes méditerranéennes et des différentes fonctions des sols reconstitués via la restauration de la vie microbienne et de la végétation (IMBE) et (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 (LCE).

Partie 1 : UMR CNRS-IRD IMBE

Participants :

- Dr. Thierry Dutoit (Directeur de recherche CNRS, UMR IMBE, coordination, 30%)
- Melle Adeline Bulot (Doctorante, UMR IMBE, écologie de la restauration, 100%)
- M. Renaud Jaunâtre (Doctorant, UMR IMBE, écologie végétale, 10%).
- Dr. Jean-François Debras (Assistant Ingénieur, INRA-PSH, entomologie, 20%).
- Dr. Erick Provost (CR CNRS, UMR IMBE, entomologie, 30%).
- Dr. Marielle Renucci (CR CNRS, UMR IMBE, entomologie, 20%)
- Dr. Fabrice Bureau (EA ECODIV, Rouen, microbiologie du sol, 20%)
- M. Kevin Potard (Master 1, EA ECODIV, Rouen, microbiologie du sol, 100%)

Résumé des travaux effectués

Le site atelier choisi pour la mise en place des expérimentations d'ingénierie écologique correspond 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).

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 ont été 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. En 2011 et 2012, ont été 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 du cailloutis de Crau < 40 cm, sol de la couche 20-40 cm, sol de la couche 0-20 cm). Aux printemps 2011 et 2012, ont également été réalisés des relevés de végétation (composition, abondance) dans les différents traitements de restauration réalisés sur le site :

- 9 quadrats témoins sur la steppe de référence autour du chantier de réhabilitation.
- 9 quadrats sur les zones non réhabilitées et comprenant seulement du cailloutis de Crau.
- 18 quadrats sur les zones réhabilitées avec les couches 20-40 cm et 0-20 cm avec ou sans compactage final (9 x 2).
- 9 quadrats sur les zones réhabilitées avec la couche 20-40 cm en surface seulement.

Nos premiers résultats (*inédits*) montrent une restauration rapide de la composition et de la richesse spécifique des différents traitements notamment ceux impliquant le transfert des horizons de sol organiques (0-20 cm) dès 2011 et non organiques (20-40 cm) dès 2012. La totalité de la composition de la végétation steppique est ainsi restaurée dès la première année pour ces traitements avec cependant une augmentation significative d'espèces indésirables (non présentes dans la steppe de référence) dans le traitement impliquant le transfert de l'horizon de sol organique. Le tassement ne montre pas de différence significative avec les traitements non tassés au niveau de la composition ou de la richesse spécifique. Le seul transfert du cailloutis implique, quant-à-lui, une baisse drastique de la richesse spécifique et un changement de la composition spécifique ne garantissant pas un retour vers la steppe de référence.

Ces résultats peuvent être expliqués par la composition physico-chimiques des sols et le fonctionnement des micro-organismes. En effet, si la couche organique transplantée ne montre pas de différence significative au niveau des teneurs en carbone total et azote total, on assiste cependant suite au déplacement de ce sol à une baisse de la teneur en matières organiques particulières qui peut être reliée à une baisse de l'apport en matières organiques (plus faible recouvrement de la végétation) suite à la transplantation, ou à une oxydation de cette matière organique labile suivi d'un lessivage des nitrates produits. La richesse fonctionnelle en micro-organismes telluriques n'est pas différente significativement entre les horizons transplantés et le sol de la steppe de référence ainsi que les activités enzymatiques mesurées. Par contre, encore une fois, la remise en place seulement du cailloutis entraîne une baisse significative de la fertilité du sol et de toutes ses fonctions ne garantissant pas, même à très long terme, un retour à la composition ou au fonctionnement du sol de la steppe de référence.

Afin d'accélérer la restauration de la structuration spatiale et de la dynamique de la végétation steppique, des fourmis moissonneuses ont été transplantées dans la zone réhabilitée dont il est attendu un rôle facilitant vis-à-vis de la dispersion et de la redistribution des espèces annuelles qui constituent plus de 50% de la composition spécifique de la steppe de référence. Après une année de transplantation de reines fondatrices réalisée durant l'automne 2011, nos résultats préliminaires montrent des taux de réussite de plus de 50% soit 500 fois plus que le taux naturel suite à une dispersion spontanée !

Ce résultat peut s'expliquer par une baisse de la prédation au sol (scolopendres, araignées, oiseaux insectivores, lézards) des reines fondatrices qui sont de fait, artificiellement introduites directement dans un habitat favorable recouvert d'un galet protecteur. Cette expérimentation sera suivie sur le moyen terme pour continuer à comparer l'évolution du taux de réussite artificielle par rapport à l'implantation naturelle et les impacts *in fine* de cette implantation sur la richesse et la distribution des espèces annuelles caractéristiques de la steppe.

L'originalité de ce protocole a entraîné une importante valorisation médiatique suite à la mise en place les 03 et 04 juin 2012 des premières journées nationales de l'ingénierie écologique par le CNRS-INEE dont ce site faisait l'objet d'une visite (*cf infra*).

Valorisation (articles, communications et posters)

Bulot A., Provost E., Marielle R. Dutoit T. Using harvested ant transplantation as a new tool in ecological engineering for restoring species-rich grasslands (La Crau, Bouches-du-Rhône, France). *Ecological Engineering* (in prep).

Dutoit T., 2011. Fuite d'hydrocarbures en Crau : Mesures compensatoires, dernier acte d'une catastrophe patrimoniale ? *Le Courrier de la Nature*, 263 :7-9.

Dutoit T., 2011. Il y a deux ans, une fuite d'hydrocarbures en Crau. *Espaces Naturels*, 35 : p 13.

Dutoit T., 2010. Réserve naturelle de Crau, fuite d'hydrocarbures : le chantier enfin en phase de réhabilitation ! *Le Courrier de la Nature*, 255 :6 - 7.

Dutoit T., 2010. *In memoriam*, le Coussoul de Crau . *Le Courrier de l'Environnement de l'INRA*, 58 : 37-44.

Dutoit T. 2009. Fuite d'hydrocarbure : un patrimoine biologique incommensurable en péril. *Le Courrier de la Nature*, 246 : 6-7.

- Bulot A., Provost E., Dutoit T., 2012. Restauration écologique d'un chantier de dépollution d'une fuite d'hydrocarbures (plaine de la Crau, Bouches-du-Rhône, France). De l'ingénierie civile à l'ingénierie écologique. *in Rever4. Rêver et Analyser*. Université de Lyon, Lyon 06-07 novembre 2012. (présentation orale)
- Bulot A., Provost E., Dutoit T., 2012. Premiers résultats de restauration écologique d'une communauté végétale suite à un accident technologique : le cas d'un chantier de réhabilitation suite à une fuite d'hydrocarbures (Crau, Bouches-du-Rhône, France). *in* Huitième colloque en Ecologie des COMMunautés VEGétales (ECOVEG8), Université de Lorraine, Nancy, 28-30 mars 2012 et *in Rever4. Rêver et Analyser*. Université de Lyon, Lyon 06-07 novembre 2012. (poster)
- Bulot A., Provost E., Renucci M., Dutoit T., 2011. La fourmi *Messor barbarus*, ingénieur de la restauration écologique de la pseudo-steppe de Crau ? *in Rever3. Rêver et s'associer*. Conseil Général de la Moselle, Metz, 3-4 février 2011. (poster)

Actions de valorisation du projet auprès des médias

- Ingénierie Ecologique*. France 2, Télématin, rubrique sciences, jeudi 16 et vendredi 17 août 2012 (7h15-7h18).
- Ecosystems under constructions*. CNRS International Magazine. n° 26. July 2012, p 20-27
- Utiliser la nature pour réparer la nature*. France Inter. Zoom de la rédaction, jeudi 14 juin 2012 (07h16)
- Utiliser la nature contre la pollution*. Europe 1. La Question Environnement, samedi 02 juin 2012 (6h45)
- L'ingénierie écologique*. Radio Classique, 3 minutes pour la Planète vendredi 01 juin 2012(6h50-6h52)
- Fourmis, brebis et Shadoks sauvent la plaine de la Crau d'une marée noire terrestre*. La Croix, mercredi 30 mai 2012. p 25
- Restaurer la Crau avec des Fourmis*. France2, journal, lundi 28 mai 2012 (13h30-13h32).
- Les premiers pas de l'ingénierie écologique*. Les Echos, lundi 21 mai 2012.
- La dépollution naturelle, nouveau défi pour le CNRS*. Les Echos, lundi 21 mai 2012.
- Des Fourmis ingénieurs !* Le Parisien, vendredi 18 mai 2012 p 7.
- Chantiers en cours en plaine de Crau*. Le Journal du CNRS n° 266. Mai-Juin 2012, p 20-27
- La Crau veut restaurer la perte de sa biodiversité*. *Le Monde*, 8 et 9 janvier 2012 p 6.
- Restauration de la Crau par implantation de fourmis moissonneuses*. *France 3, 19/20 national*, mardi 27 décembre 2011 (19h47-19h50).
- Pétrole : la plaine de la Crau a pansé ses plaies*. *Le Figaro*. Vendredi 15 Avril 2011, p 11.
- Réserve classée : un sinistre pollution hors normes*. *Riskmanagement*, Juin 2010, p 20-22.
- Le casse tête de la dépollution dans la Crau*. *GlobalMag. Arte*. 13 avril 2010 (19h30).
- La plaine de Crau en cours de dépollution*. *Le Figaro*. 21 et 22 novembre 2009.
- Rupture de pipeline dans la plaine de La Crau : le chantier de dépollution prend de l'envergure*. *Les Echos*, 30 septembre 2009.
- Possible aggravation de la pollution de la réserve naturelle des Coussouls de Crau*. *Le Monde*, 09 septembre 2009.
- La Crau, dernière steppe protégée d'Europe*. *Méridien Mag*. Novembre-décembre 2012. pp. 50-51.
- Lacher de fourmis moissonneuses en Crau*. *Chasser en Provence*. Juillet/août/septembre 2012 26 p 44
- Comment la marée noire de la Crau a disparu*. *La Provence*. Mercredi 16 mai 2012.
- Réserve naturelle des Coussouls de Crau : réhabilitation en cours*. *Objectif méditerranée*. Mars 2011, n°119 p 35.
- La Crau veut soigner son écosystème*. *20 minutes Marseille*. 28 février 2011.
- Des travaux colossaux débutent pour soigner la plaine de La Crau*. *La Provence*. Lundi 7 février 2011. p 28.
- Tout pour retrouver la steppe originelle*. *La Marseillaise*. Lundi 31 janvier 2011 p 10.
- Réserve naturelle de la Crau : dépollution en cours*. *Objectif méditerranée*. Mars 2010, n°110 p 36
- Pipeline de la Crau : Une reprise sous pression*. *Objectif méditerranée*. Janvier 2010, n°108 p 37.
- La renaissance compromise du Coussoul*. *La Marseillaise*. 28 novembre 2009.

Partie 2 : UMR CNRS LCE

Participants :

- Dr. Patrick Höhener (professeur, coordination, 30%)
- Dr. Pascale Prudent (MCF, chimie analytique, 20%)
- Carine Demelas (Technicienne, 20%)
- Violaine Ponsin (Doctorante)
- Olsen Mouloubou (Stagiaire Master 2, puis doctorant)

Résumé des travaux effectués

La réserve naturelle nationale des Coussouls de Crau est une réserve française créée en 2001 dans le département des Bouches-du-Rhône pour préserver la richesse d'un écosystème steppique unique en France. Le 7 août 2009, l'oléoduc qui alimente en pétrole depuis Fos, le nord-est du pays et une partie de l'Allemagne, a explosé dans cet écosystème, déversant plusieurs milliers de mètres cubes de pétrole, polluant ainsi cinq hectares de cette réserve naturelle et la nappe qui se situe en dessous de cette steppe.

Cette étude avait pour objectif d'étudier la dépollution de la nappe souillée par le pétrole par dégradation microbiologique. Elle visait une stimulation de l'activité microbiologique en laboratoire dans des flacons (microcosmes), en fonction de différents paramètres censé être stimulants pour différentes conditions permettant une dégradation assez rapide et efficace des hydrocarbures. L'étude a été préparée en 2011, et son volet principal s'est déroulé de janvier à octobre 2012 dans le cadre d'une thèse doctorale et d'un stage de Master 2 de 6 mois. Un scénario de référence (microcosme témoin nommé « microcosme naturel avec pétrole » NAT) a été mis en place, contenant : de l'eau de la nappe, des oxydants en concentrations naturels, des microorganismes provenant du site, du pétrole, et des sédiments. Des déviations du scénario de référence ont été réalisées, avec d'une part des ajouts d'oxydants (oxygène, nitrate, oxydes de manganèse et fer, sulfate) et d'autre part des ajouts d'oxydants et de nutriment (le phosphate), avec pour objectif de stimuler la biodégradation du pétrole brut sous ces différentes conditions d'oxydoréduction distinctes.

On a observé une consommation totale d'oxydant dans les microcosmes « naturel » avec pétrole en 50 jours. Cette consommation est plus élevée dans les microcosmes contenant oxygène et phosphate (OXYP), soit 16% d'O₂ en 14 jours. Dans les microcosmes contenant nitrate et phosphate (NITP), 141 mg/L de nitrate est consommé en 28 jours. Ces consommations sont accompagnées par une apparition de produits de dégradation tels que le CO₂, produit à 11.6 % en 63 jours dans les microcosmes OXYP. La production la plus élevée d'hydrogénocarbonates est observée dans les microcosmes NITP avec une production de près de 300 mg/L en 77 jours. Dans ces microcosmes, une disparition nette des hydrocarbures volatiles aliphatiques est observée. Le nutriment utilisé (phosphate) est consommé dans tous les microcosmes, en particulier dans ceux amendé par le fer (FERP) et le manganèse (MANP) après respectivement 28 jours (8,4 mg/L) et 35 jours (6 mg/L).

Cette étude confirme qu'une dégradation du pétrole par des microorganismes autochtones est facilement étudiable en microcosmes. Les conditions naturelles permettent bien une dégradation du pétrole, mais assez faible et lente. Des stimulations de la biodégradation sont réalisées avec l'ajout d'oxygène, nitrate, et oxydes de fer et manganèse et ajout conjoint du phosphate comme nutriment. Pour ces réactions d'oxydoréduction, le phosphate est donc un

facteur limitant. L'étude a, par contre, pu démontrer une nette stimulation de la dégradation du pétrole sous conditions sulfato-réductrices et méthanogènes seulement tardivement après une longue phase de latence (respectivement 104 et 148 jours)

Valorisation (articles, communications et posters)

Une publication contenant les résultats de cette étude est en cours de rédaction pour être soumise à la revue *Journal of Contaminant Hydrology*. L'étude a été présentée à *EnviroRisk* le 5 et 6 octobre 2011 à l'Europôle de l'Arbois, Aix-en-Provence. Aux rencontres des doctorants financés par l'ADEME en janvier 2012 à Angers, l'étude a été présentée sous forme de poster. De même, elle a été présentée au grand public lors des journées Ecotechnologies CNRS en juin 2012. L'étude sera également présentée au congrès international « *Groundwater Quality 2013* » qui se tiendra en avril 2013 à Gainesville, en Floride.

Ponsin V. et al. Stimulation of crude oil biodegradation by phosphate under varying redox conditions. Article en cours de rédaction pour *Journal of Contaminant Hydrology*.

Ponsin V., Rainness Mouloubou O., Prudent P., Höhener P. Enhancement of natural attenuation of crude oil in a pristine aquifer by nutrients: microcosm study. Abstract soumis à Conférence GQ13, Avril 2013.

Höhener P., Ponsin V., Maier J., Guelorget Y. Enhancement of natural attenuation of crude oil in a pristine aquifer by nutrients; fields results and modelling. Abstract soumis à Conférence GQ13, Avril 2013.

Ponsin V., Guelorget Y. 2011. Gestion d'un évènement en milieu naturel. *Environnement et Technique* n° 310 / Octobre 2011, p 26-32.

Ponsin V., Guelorget Y. Gestion d'un accident technologique en milieu naturel. L'eau, l'industrie, les nuisances. n° 349 – p 55-59 (www.revue-ein.com)

Ponsin., 2012. L'atténuation naturelle du pétrole brut dans l'aquifère de la plaine de la Crau
Poster, Rencontres ADEME, Janvier 2012, Angers.

Perspectives générales

Les thèses co-financées par l'ADEME, la région PACA et la société SPSE impliquée dans l'accident se poursuivra encore pendant deux années. Néanmoins, un financement pour une deuxième thèse sera demandé au prochain appel d'offre de l'ANR Ecotechnologie, qui n'a malheureusement pas ouvert en 2012 et dont nous attendons l'ouverture au printemps 2013. Ce programme a également permis la mise en place de collaborations avec EA ECODIV de l'université de Rouen concernant les volets microbiologie et matières organiques du sol. Outre les financements obtenus par l'ADEME, la société SPSE et la Région PACA, une subvention a été obtenue du Conseil Général 13. Enfin, la SFR TERSYS (Avignon) a financé un volet consacré à l'étude de l'impact de la réhabilitation du chantier sur les assemblages de coléoptères terricoles avec l'unité INRA PSH (Jean-François Debras) dont les premiers résultats sont en cours d'analyses.