

Mise en place d'une approche intégrée pour la restauration écologique des milieux pollués du Parc national des Calanques

Alma Heckenroth, Jacques Rabier, Paul Monsara, Lidwine Le Mire Pecheux, Pascale Prudent, Maria Isabel Sastre-Conde, Isabelle Laffont-Schwob

▶ **To cite this version:**

Alma Heckenroth, Jacques Rabier, Paul Monsara, Lidwine Le Mire Pecheux, Pascale Prudent, et al.. Mise en place d'une approche intégrée pour la restauration écologique des milieux pollués du Parc national des Calanques. Naturae, 2017, 9, pp.1-14. hal-01577967

HAL Id: hal-01577967
https://amu.hal.science/hal-01577967

Submitted on 30 Apr 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

naturae

2017 • 9



Mise en place d'une approche intégrée pour la restauration écologique des milieux pollués du Parc national des Calanques

Heckenroth A., Rabier J., Monsara P., Le Mire-Pecheux L., Prudent P., Sastre Conde M. I. & Laffont-Schwob I.

art. 9 — Publié le 28 juin 2017
Texte intégral disponible sur internet : www.revue-naturae.fr

MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE
PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

Directeur de la publication : Bruno David,
Président du Muséum national d'Histoire naturelle

Rédacteur en chef / *Editor-in-chief* : Jean-Philippe Siblet

Assistante de rédaction / *Assistant editor* : Sarah Figuet (naturae@mnhn.fr)

Mise en page / *Page layout* : Sarah Figuet

Comité scientifique / *Scientific board* :
Luc Abbadie (UPMC, Paris)
Luc Barbier (Parc naturel régional des caps et marais d'Opale, Colembert)
Aurélien Besnard (CEFE, Montpellier)
Vincent Boullet (Expert indépendant flore/végétation, Frugières-le-Pin)
Hervé Brustel (École d'ingénieurs de Purpan, Toulouse)
Audrey Coreau (AgroParis Tech, Paris)
Bernard Deceuninck (LPO, Rochefort)
Thierry Dutoit (UMR CNRS IMBE, Avignon)
Éric Feunteun (MNHN, Dinard)
Grégoire Gautier (Parc national des Cévennes, Florac)
Olivier Gilg (Réserves naturelles de France, Dijon)
Frédéric Gosselin (Irstea, Nogent sur Vernisson)
Frédéric Hendoux (MNHN, Paris)
Xavier Houard (OPIE, Guyancourt)
Isabelle Leviol (MNHN, Paris)
Francis Meunier (Conservatoire d'espaces naturels – Picardie, Amiens)
Serge Muller (MNHN, Paris)
Francis Olivereau (DREAL Centre, Orléans)
Laurent Poncet (MNHN, Paris)
Nicolas Poulet (ONEMA, Toulouse)
Jean-Philippe Siblet (MNHN, Paris)
Laurent Tillon (ONF, Paris)
Julien Touroult (MNHN, Paris)

Naturae est une revue publiée par les Publications scientifiques du Muséum, Paris
Naturae *is a journal published by the Museum Science Press, Paris*

Naturae est distribuée en Open Access sur le site web des Publications scientifiques du Muséum :
http://www.revue-naturae.fr

Les Publications scientifiques du Muséum publient aussi :
The Museum Science Press also publish:

European Journal of Taxonomy
Revue électronique / *Electronic journal* – http://www.europeanjournaloftaxonomy.eu

Adansonia
Abonnement / *Subscription* 2017 : Institutions / *Institutions* : 71,09 € ; Particuliers / *Individuals* : 35,55 €

Anthropozoologica
Abonnement / *Subscription* 2017 : Institutions / *Institutions* : 52,13 € ; Particuliers / *Individuals* : 26,07 €

Geodiversitas
Abonnement / *Subscription* 2017 : Institutions / *Institutions* : 146,91 € ; Particuliers / *Individuals* : 73,46 €

Zoosystema
Abonnement / *Subscription* 2017 : Institutions / *Institutions* : 146,91 € ; Particuliers / *Individuals* : 73,46 €

Mise en place d'une approche intégrée pour la restauration écologique des milieux pollués du Parc national des Calanques

Alma HECKENROTH
Institut méditerranéen de Biodiversité et d'Écologie marine et continentale (IMBE),
Aix-Marseille Université, CNRS, IRD, Avignon Université,
3 place Victor Hugo, case 4, F-13331 Marseille (France)
et OGD Groupe ORTEC - Ortec générale de Dépollution, Parc de Pichaury,
550 rue Pierre Berthier, CS 80348, F-13799 Aix-en-Provence Cedex 3 (France)
alma.heckenroth@imbe.fr

Jacques RABIER
Institut méditerranéen de Biodiversité et d'Écologie marine et continentale (IMBE),
Aix-Marseille Université, CNRS, IRD, Avignon Université,
3 place Victor Hugo, case postale 4, F-13331 Marseille (France)
jacques.rabier@imbe.fr

Paul MONSARA
Lycée agricole des Calanques (LPA),
89 traverse Parangon, F-13008 Marseille (France)
paul.monsara@educagri.fr

Lidwine LE MIRE-PECHEUX
Parc national des Calanques,
Bât A4 – Impasse Paradou, F-13009 Marseille (France)
Lidwine.lm-pecheux@calanques-parcnational.fr

Pascale PRUDENT
Aix-Marseille Université, CNRS, Laboratoire de Chimie de l'Environnement (LCE),
3 place Victor Hugo, case postale 29, F-13331 Marseille (France)
pascale.prudent@univ-amu.fr

Maria Isabel SASTRE CONDE
Serveis de Millora Agraria i Pesquera, Semilla,
C/ Babieca nº 2, Son Ferriol (Palma de Mallorca) Les Îles Baléares (Espagne)
isabelsastre2003@yahoo.es

Isabelle LAFFONT-SCHWOB
Institut méditerranéen de Biodiversité et d'Écologie marine et continentale (IMBE),
Aix-Marseille Université, CNRS, IRD, Avignon Université,
3 place Victor Hugo, case postale 4, F-13331 Marseille (France)
isabelle.laffont-schwob@univ-amu.fr

Publié le 28 juin 2017

Heckenroth A., Rabier J., Monsara P., Le Mire-Pecheux L., Prudent P., Sastre Conde M. I. & Laffont-Schwob I. 2017. — Mise en place d'une approche intégrée pour la restauration écologique des milieux pollués du Parc national des Calanques. *Naturae* 9: 1-14.

RÉSUMÉ

Depuis 2008, sur le site de la friche industrielle de l'Escalette à Marseille, au sein de la zone cœur du Parc national des Calanques (PNCal), scientifiques, gestionnaires et praticiens travaillent de pair pour développer des alternatives aux techniques conventionnelles de dépollution du sol. La particularité de ce site est cependant d'abriter une biodiversité riche, façonnée par le climat et la pression anthropique depuis l'époque gréco-romaine, aujourd'hui menacée par la pollution en éléments traces métalliques et métalloïdes (ETMM) liée aux activités industrielles du XIX^{e} siècle. En parallèle d'une action publique de gestion des déchets industriels (scories) sur la zone littorale du PNCal, une réflexion est menée sur la gestion de la pollution diffuse sur ce territoire. Les objectifs de la restauration écologique visent à la fois la conservation de la biodiversité locale, l'optimisation des fonctions racinaires et rhizosphériques qui permettent la réduction des transferts des ETMM, la refonctionnalisation des sols et, de façon plus globale, le développement d'écotechnologies pour la restauration des sols pollués dans un contexte méditerranéen. La caractérisation des écosystèmes contaminés a permis d'identifier des communautés de plantes natives tolérantes à la pollution, puis de développer des outils d'ingénierie écologique, notamment basés sur la transplantation d'individus de *Coronilla juncea* L., considérée comme une espèce ingénieur. La collaboration initiée en 2013 avec le Lycée agricole des Calanques (LPA) a aussi permis la multiplication des plantes cibles et de disposer d'une expertise en agroécologie. Des essais de restauration écologique sont maintenant menés conjointement entre partenaires scientifiques, du LPA et du PNCal depuis septembre 2015.

MOTS CLÉS

Coronilla juncea L., écotechnologies, ingénierie écologique, Méditerranée, métaux et métalloïdes, phytostabilisation, plantes natives, sols pollués.

ABSTRACT

Implementing an integrated approach for ecological restoration of the polluted ecosystems in the Calanques National park.

On the former lead smelting factory of l'Escalette (South-East coast of Marseille, France), recently included in the first peri-urban French national park, the Calanques National Park (PNCal), scientists and stakeholders have been working together since 2008 to develop alternatives to conventional soil remediation techniques. However the particularity of this site is to support a rich biodiversity, shaped by the climate and the anthropic pressure since the Greco-Roman era, now threatened by the pollution of trace metals and metalloids (TMM) linked to the industrial activities of the 19th century. In parallel with a government action to manage industrial wastes (slag) on the coastal zone of the PNCal, the management of the diffuse pollution by ecological engineering tools is explored by scientists and practitioners. Thereby, the aims of this ecological restoration project are the local biodiversity conservation, the optimizisation of the roots and rhizospherics functions reducing TMM transfer, the rehabilitation of soil functions, and more globally, the development of ecotechnologies to restore polluted soils in the Mediterranean context. In a first step, researches focused on the characterization of soil pollution and ecosystem contamination (i.e. calcareous shrublands and grasslands), in order to select the most tolerant native plants to be used as pioneer species. The results obtained highlighted a high heterogeneity in the soil contamination. Observations of soil-plant-microorganism interactions led to the development of ecological engineering tools to optimize phytostabilization potential of native plant communities. Moreover, the growth of native plants should improve the soil quality by reducing erosion and pollutant (TMM) availability. Thus, we aimed at developing ecological engineering tools, based on the use of engineer species such as the legume *Coronilla juncea* L., expected to promote the resilience of soil and plant community. A local agricultural high-school (LPA) has also been invested in the project since 2013 to allow the multiplication of the targeted native plants, consequently providing an expertise in agroecology. Since September 2015, the first ecological restoration field trials were being performed by academics, practitioners and stakeholders, always under of approval of the PNCal Charter.

KEY WORDS

Coronilla juncea L., ecotechnologies, ecological engineering, Mediterranean, metal and metalloids, phytostabilization, native species, polluted soils.

PRÉAMBULE

Sur le site de la friche industrielle de l'Escalette à Marseille, au sein de la zone cœur du Parc national des Calanques (PNCal) aux portes d'une grande métropole, scientifiques, gestionnaires et praticiens travaillent de pair pour développer des alternatives aux techniques conventionnelles de gestion de la pollution du sol. Le PNCal présente en effet sur son territoire une biodiversité riche et menacée soumise à une pollution historique en éléments traces métalliques et métalloïdes (ETMM). Le croisement de ces différents enjeux représente un défi pour les gestionnaires. Cet article dresse un premier état des lieux des réflexions et expériences menées depuis quelques années pour favoriser la restauration écologique des sites du PNCal soumis à une pollution diffuse en ETMM.

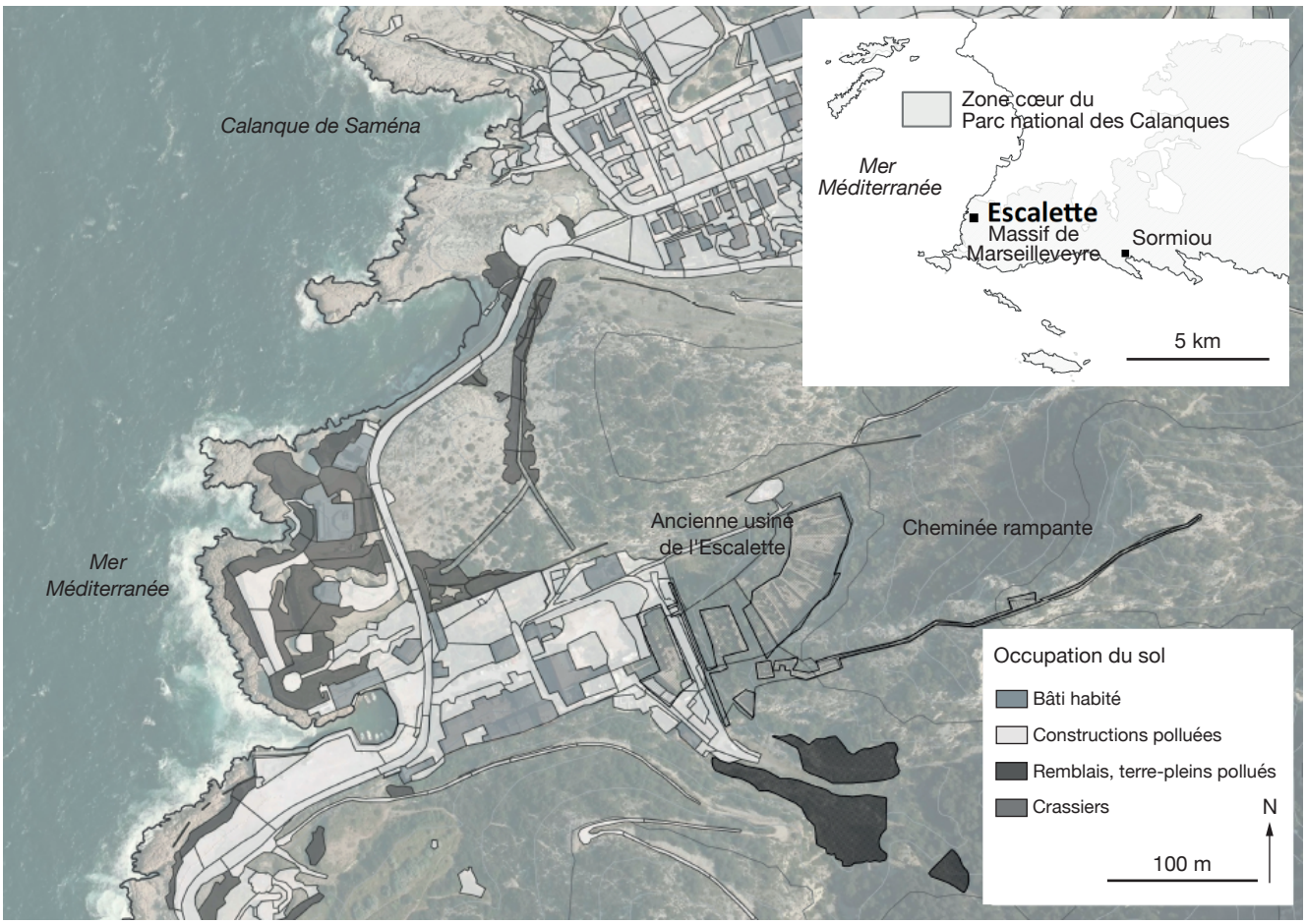


FIG. 1. — Localisation de la friche industrielle de l'Escalette, du massif de Marseilleveyre dans la zone cœur du Parc national des Calanques sur le littoral sud de la ville de Marseille et situation du site d'étude. Carte réalisée par A. Heckenroth à partir de données de P. J. Dumas sur QGIS 2.2 Valmiera.

INTRODUCTION

Sur le territoire du PNCal récemment créé (2012), la plus grosse activité industrielle de la fin du XIX^{e} – début du XX^{e} siècle – sur le massif de Marseilleveyre comme dans tout le pourtour de la ville de Marseille concernait la métallurgie (Daumalin & Raveux 1999 ; Daumalin 2006 ; Garnier & Zimmermann 2006). Ces activités fortement polluantes, notamment la transformation de minerais, ont causé une contamination importante de l'environnement qui s'est perpétuée dans l'espace et le temps bien après la fermeture des usines (MARSECO 2012). L'ensemble de ces industries a aujourd'hui cessé ses activités mais aucune démarche globale de réhabilitation n'a encore été entreprise. Ceci est notamment le cas de l'usine de l'Escalette, située sur une portion littorale comprise dans le massif de Marseilleveyre, au sud de l'agglomération marseillaise (Fig. 1).

Ces pratiques industrielles et post-industrielles ont entraîné une dispersion de la pollution sur toute la partie littorale du massif de Marseilleveyre. En 2005, des concentrations élevées en plomb et en arsenic ont été mises en évidence notamment dans les sols et dans des coquillages (moules) et des oursins proches de l'Escalette consommés par la population locale. La Direction régionale des Affaires sanitaires et sociales (DRASS PACA), avait ainsi déterminé que le fait de résider à l'Escalette, de fréquenter la plage de Saména (Fig. 1) et de consommer les oursins (la consommation des moules étant déjà interdite sur cette portion du littoral) pouvait être à « l'origine d'un risque sanitaire inacceptable pour la population et plus particulièrement pour les jeunes enfants ». De plus, elle préconisait des actions d'ordre sanitaire (dépistage du saturnisme) et environnemental afin de réduire l'exposition de la population à la pollution (InVS-DRASS 2005 ; SPPPI-PACA 2006). Dans le cadre du projet de recherche interdisciplinaire MARSECO 2008-2013 (financé par l'Agence nationale de la Recherche, MARSECO 2012), des analyses de sol ont été effectuées sur un maillage plus large incluant le massif de Marseilleveyre. Les résultats ont pu prouver la présence d'ETMM en fortes concentrations dans le sol (Tableau 1), comme le plomb (Pb), le zinc (Zn), l'arsenic (As), le cuivre (Cu) et l'antimoine (Sb) selon des patrons de dispersion majoritairement définis par les vents et le relief (Testiati *et al.* 2013 ; Affholder *et al.* 2014 ; Laffont-Schwob *et al.* 2016).

Les transferts de ces polluants dans les différents compartiments ont été étudiés (air, eau, sol, plantes). Des capteurs atmosphériques ont révélé la présence de fines particules atmosphériques sur lesquelles sont adsorbées des éléments métalliques, telles que

TABLEAU 1. — Ordres de grandeur des concentrations totales en ETMM, en mg.kg^{-1} de matière sèche (m.s.) dans les sols, les scories et les poussières de cheminées du site de la friche industrielle de l'Escalette (d'après Testiati *et al.* 2013), teneurs totales en ETMM dans les sols français (d'après Darmendrail *et al.* 2000) et valeurs limites de concentrations en ETMM admises dans les sols (Arrêté ministériel du 08 janvier 1998 ; Afnor NF-U-44-041, 1985).

	Concentrations en mg.kg^{-1} m.s.				
Paramètres étudiés	**Pb**	**As**	**Sb**	**Cu**	**Zn**
Données issues des analyses réalisées sur le site de l'Escalette					
Sols (n = 38)					
min-max	75-130 000	<8-7 000	<5-9 030	20-7 900	210-65 600
moyenne	21 518	921	1 182	1 251	13 618
Scories (n = 4)					
min-max	55 800-127 300	500-1 200	398-8 460	1 620-5 090	35 400-88 600
moyenne	84 000	735	3 116	2 620	54 000
Poussières dans ruines de la cheminée moyenne (n = 2)	128 600	86 560	1 990	178	6 770
Données issues des analyses de référence sur les sols français et valeurs seuils des normes françaises					
Teneurs totales dans les sols français (n ≈ 800)					
min-max	2-3 088	–	–	<2-107	<5-3 820
moyenne	65	–	–	15	149
Concentrations limites admises dans les sols d'après AM 08 janvier 1998 et NF-U-44-041	100	29	–	100	300

le plomb (MARSECO 2012). Ces éléments proviennent du sol, mais pourraient également provenir de la dégradation du bâti de l'usine de l'Escalette sous l'effet de l'érosion les jours de vent fort. Ces éléments ont également été mis en évidence dans les parties aériennes et racinaires de certaines espèces végétales locales, parmi lesquelles des plantes aromatiques comme le Romarin *Rosmarinus officinalis* L. (Affholder *et al.* 2013) posant la question des risques d'exposition pour les usagers des Calanques pratiquant la cueillette ou la chasse. Alors que les dépôts massifs, considérés comme étant les sources principales de risques sanitaires, font l'objet actuellement d'un projet de gestion de la pollution dont l'Agence de l'Environnement et de la maîtrise de l'Énergie (ADEME) est maître d'ouvrage depuis 2012 (Barthélémy 2016), les risques liés à la pollution diffuse sont moins bien identifiés et donc non pris en compte, notamment sur la santé et l'environnement (Laffont-Schwob *et al.* 2016). C'est pourquoi des expérimentations de phytoremédiation (voir Annexe 1) en vue de la restauration écologique de l'Escalette sont menées au sein de l'Institut méditerranéen de Biodiversité et d'Écologie marine et continentale (IMBE) en laboratoire et sur le terrain, en collaboration avec le Laboratoire de Chimie de l'Environnement (LCE) et le Lycée agricole des Calanques (LPA), pour proposer des solutions efficaces afin de réduire les transferts d'ETMM en adéquation avec les contraintes du milieu et de la biodiversité locale. La phytostabilisation (voir Annexe 1) semblerait être une solution adaptée à la pollution diffuse du site (Laffont-Schwob *et al.* 2011a ; Testiati *et al.* 2013 ; Affholder *et al.* 2014 ; Heckenroth *et al.* 2014 ; Heckenroth *et al.* 2016a) pour réduire efficacement les transferts par la végétation locale tout en la restaurant. Cette démarche s'intègre dans le projet de recherche interdisciplinaire A*MIDEX SynTerCalm (Synergie sur le Territoire des Calanques marseillaises), regroupant des scientifiques en Sciences de la Vie et de l'Environnement et en Sciences humaines et sociales, pour le développement de solutions intégrées de gestion de la pollution sur le territoire des Calanques marseillaises et plus généralement en zone méditerranéenne.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

SITE D'ÉTUDE

Actuellement, l'Escalette comprend un petit port, une zone d'habitation comprenant une trentaine de logements, des ruines correspondant à l'ancienne usine, ainsi que des milieux anthropisés (terre-pleins, remblais, crassiers) et des zones naturelles de garrigues et de pinèdes (Fig. 1). Ce site est constitué d'une mosaïque de propriétaires. Le Conseil départemental des Bouches-du-Rhône (CD13) y possède essentiellement des terrains non habités, dont les crassiers situés dans le vallon de l'Escalette. Il est à noter qu'un unique propriétaire possède une grande partie du quartier habité de l'Escalette, ainsi que la zone correspondant à l'ancienne usine ; les propriétaires restants étant principalement regroupés en une copropriété. L'ensemble de l'Escalette est classé en « zone naturelle à protéger – préservation intégrale » (NDn) (PLU de la commune de Marseille 2010) et depuis la création du PNCal en avril 2012, le site est intégré à la zone de cœur terrestre. Dans cette usine, une activité de transformation de la galène argentifère s'est tenue entre 1851 et 1925 pour la production de plomb et d'argent (Daumalin & Raveux 1999). Une longue cheminée rampante a été construite pour éloigner du site les fumées nocives (Fig. 1) et a contribué à l'extension de la contamination au massif de Marseilleveyre (Affholder *et al.* 2014). Les scories (déchets de la métallurgie) ont été déposées dans des crassiers et notamment dans celui du vallon proche de l'usine (Fig. 1). À l'heure actuelle, les ruines de l'usine et les crassiers sont toujours en place (Gallimard 2000), et constituent une source de pollution concentrée sur le site qui est disséminée par le vent et l'eau sur les zones alentours (Laffont-Schwob *et al.* 2011b ; Testiati *et al.* 2013 ; Affholder *et al.* 2014 ; Laffont-Schwob *et al.* 2016). De plus, les remblais riches en scories ont fourni au début du XX^{e} siècle un matériau bon marché, essentiellement pour la construction de la chaussée et des avancées sur la mer sur une portion du littoral longue de plusieurs kilomètres. En totalité, ces dépôts sont au nombre de 12 dépôts principaux et 77 sous-dépôts, représentant une surface contaminée de 29 ha (SPPPI-PACA 2006).

La zone de l'Escalette et ses alentours, sous l'influence d'un climat méditerranéen semi-aride, abritent une biodiversité remarquable, notamment concernant les formations végétales (Affre *et al.* 2015), typiques du massif des Calanques. Le vent constitue une composante essentielle à ce climat particulier, notamment le Mistral qui souffle environ 135 jours par an (Aillaud & Crouzet 1988), de secteur nord-ouest, froid, sec et pouvant être très violent. Les effets du vent sont multiples, notamment sur les plantes, par l'aggravation des phénomènes de xéricité (voir Annexe 1) du milieu et le transport des embruns salés (pouvant être pollués par des hydrocarbures et tensio-actifs) sur plusieurs centaines de mètres à l'intérieur des terres (Sigoillot 1987 ; Giovannelli *et al.* 1988 ; Loglio *et al.* 1989). Ce gradient décroissant de salinité depuis le littoral (Crouzet 1975) est un facteur majeur de la répartition des habitats littoraux depuis les formations halophiles (voir Annexe 1) aux halotolérantes (voir Annexe 1). Ces fortes contraintes environnementales naturelles ont contribué au développement d'une Flore et d'une Faune d'intérêt dans le massif de Marseilleveyre, classé en site Natura 2000 en 2003 et justifient son classement dans la zone de cœur du Parc national des Calanques en 2012 (Fig. 1). De plus, la combinaison des perturbations anthropiques qui affectent la zone littorale (pollution industrielle et urbaine, fréquentation humaine) accroît la vulnérabilité des milieux naturels à forts enjeux de conservation. L'habitat phrygane (voir Annexe 1) (*Astragalo-plantaginetum subulatae* ; code Natura 2000 EUR27 : 5410), est un exemple typique de formation végétale thermoxérophile (voir Annexe 1) ouest-méditerranéenne en coussinets épineux (Molinier 1934 ; Laffont-Schwob *et al.* 2011b ; Ami *et al.* 2013 ; Affre *et al.* 2015). Les zones naturelles polluées du massif de Marseilleveyre se caractérisent également par la présence d'espèces typiques du climat thermo-méditerranéen, comme le lentisque (*Pistacia lentiscus* L.) ou le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) (Knoerr 1959 ; Quézel & Médail 2003), qui se développent aussi sur les sols à pollution diffuse. Ainsi le PNCal doit prendre en considération les processus de transfert de ces pollutions et agir en conséquence pour limiter leurs effets délétères sur la biodiversité (tels que la perte de biodiversité microbienne des sols). Dans ce cadre, un partenariat fort avec les scientifiques travaillant dans le domaine de la restauration écologique et des écotechnologies ouvre des perspectives pour concilier protection de la biodiversité et gestion durable de la pollution diffuse (Heckenroth *et al.* 2016b).

Des collaborations locales multiples en faveur de la restauration écologique

Pour répondre aux objectifs de gestion de la pollution diffuse au sein du PNCal et de conservation de la biodiversité, deux projets de recherche successifs (Marséco 2008-2013 et SynTerCalM 2014-2016), basés sur des écotechnologies (voir Annexe 1), ont été conduits dans le cadre d'une approche transdisciplinaire suivant trois étapes :

– la caractérisation des communautés végétales locales dans le contexte d'une forte pollution en ETMM et la sélection de plantes natives à potentiel de phytoremédiation (Heckenroth *et al.* 2016b) ;

– l'évaluation de l'effet de l'hétérogénéité de la contamination sur les mécanismes de tolérance des plantes et des implications sur le potentiel de phytostabilisation ;

– le développement d'outils d'ingénierie écologique (voir Annexe 1) pour la restauration écologique (voir Annexe 1) des zones naturelles contaminées en ETMM.

Dès 2012, le démarrage d'un travail de thèse a permis d'articuler ces différentes étapes autour d'un cadre commun pour la restauration écologique des milieux pollués du PNCal. Sur la base des connaissances transdisciplinaires acquises par le projet de recherche Marséco sur les transferts de contaminants au sein du PNCal (MARSECO 2012), la collaboration entre les écologues de l'IMBE et les chimistes de l'environnement du LCE s'est poursuivie sous la forme d'une expertise concernant l'évaluation de la contamination des sols et de la végétation (Testiati *et al.* 2013 ; Affholder *et al.* 2014 ; Heckenroth *et al.* 2014, 2016b) et l'évaluation des capacités de phytostabilisation des plantes natives (Laffont-Schwob *et al.* 2011a, 2011b ; Rabier *et al.* 2014 ; Heckenroth *et al.* 2015a). Les expérimentations menées *in* et *ex situ* sur des milieux et espèces protégées ont donné lieu à un suivi et un accompagnement de la part du PNCal, tant sur les objectifs des études et la gestion de la biodiversité que sur le cadrage règlementaire associé aux campagnes de prélèvements. Les équipes de recherche ont développé des protocoles pour limiter les impacts sur le terrain notamment par l'utilisation d'appareils de mesures et de méthodologies non destructifs (Laffont-Schwob *et al.* 2011b ; Rabier *et al.* 2014 ; Heckenroth *et al.* 2016b). Le CD13, en accordant dès septembre 2011 la mise à disposition d'un terrain, a permis de répondre à la question de la localisation de la zone expérimentale de travaux de restauration. Lors de la sélection de plantes natives destinées à la restauration expérimentale *in situ* des sols contaminés, nous nous sommes rapidement confrontés à leur absence de disponibilité commerciale puis à un manque de main-d'œuvre et d'espaces pour la multiplication des plants. Ainsi, en 2013, une convention a été signée entre l'IMBE et le LPA (établissement d'enseignement technique agricole et d'aménagement) pour la mise au point de techniques de multiplication des plantes natives sélectionnées à partir de propagules (graines et boutures) prélevées sur site. Cette collaboration permet aussi de répondre à la règlementation du PNCal relative à l'emploi de plantes locales pour les travaux de restauration écologique. Grâce au soutien apporté par le LPA, ce partenariat a permis de fournir les moyens humains, techniques et le matériel végétal nécessaire à la réalisation de pilotes de restauration écologique sur le terrain. De plus, après une étape de production en pépinière hors site et une étape de validation des écotechnologies *in situ*, ce projet participe au développement de techniques d'ingénierie écologique adaptées aux milieux méditerranéens pollués. Au final, cette collaboration regroupe différents aspects :

– l'implication du Lycée des Calanques sur son propre territoire ;

– le transfert de connaissances sur la restauration écologique, la phytoremédiation et l'ingénierie écologique auprès de futurs professionnels de l'aménagement du territoire ;



Fig. 2. — Aménagement de la zone de production du Lycée des Calanques avant (à gauche) et après travaux (à droite). Crédit photo : Paul Monsara.

– l'aménagement de surfaces de production intégrée sur le site du Lycée des Calanques ;
– la récolte de propagules sur le terrain et la multiplication en pépinière de plantes natives du PNCal ;
– une réflexion collective autour de techniques d'ingénierie écologique et d'agroécologie pour la mise en place d'une restauration écologique expérimentale sur le terrain en étroite collaboration avec le PNCal.

Ce consortium d'acteurs locaux permet donc le développement d'écotechnologies adaptées aux terrains contaminés du PNCal et inspirées des connaissances sur les sols, plantes et microorganismes natifs, dans le cadre de collaborations entre chercheurs, gestionnaires et professionnels acteurs du projet (Heckenroth *et al.* 2015b, 2016a). Par le transfert des connaissances, réciproque entre le domaine de la recherche universitaire et celui de l'éducation technique et professionnelle agricole, cette collaboration permet également de contribuer au développement de la filière professionnelle de l'ingénierie écologique en France (Rey *et al.* 2014), en accord avec les objectifs de conservation de la biodiversité du ministère de l'Environnement de l'Énergie et de la Mer (MEEM).

Un outil de production local

Le Lycée agricole des Calanques est un établissement dont l'atelier technologique est tourné vers « l'aménagement paysager », sans terrain dédié à l'exploitation agricole mais uniquement un parc paysager et forestier. D'abord considéré comme une contrainte, ce fait est devenu l'opportunité de créer une pépinière locale pour satisfaire les besoins d'une restauration écologique des terrains pollués du PNCal. La première étape a donc été la conception d'une mini-pépinière intégrée au lycée en valorisant les atouts du site, et précisément un espace de pinède et de garrigue (Fig. 2), qui a fourni des expositions au soleil variées, et d'anciennes terrasses de production agricole (restanques). Le site, intégré à la zone d'adhésion optimale du PNCal, est proche de la zone à restaurer et fournit donc des conditions pédo-climatiques similaires aux plantes en place, de leur production jusqu'à leur plantation sur le site de l'Escalette. 90 élèves de cinq classes, encadrés par cinq enseignants, se sont mobilisés autour de la création de la pépinière afin de satisfaire les impératifs de production tels que l'aménagement de surfaces praticables, la disponibilité en eau, la mise en place d'une serre pour assurer les semis et le développement des jeunes boutures, et enfin la protection du site contre les sangliers et autres perturbations d'origine humaine. Les travaux d'aménagement de la pépinière ont également été réalisés dans une volonté de limiter les impacts sur les terrains du lycée et d'utiliser des matériaux locaux. Ainsi, les surfaces de production ont été nivelées en douceur et les murets de soutènement aménagés ou restaurés en pierre et en troncs d'arbres locaux (Fig. 2) récemment abattus par des élèves après avoir été marqués par l'Office national des Forêts (ONF). Enfin, le système d'irrigation installé a nécessité l'acheminement de l'eau par 120 m de tuyau polyéthylène HD (40 mm) dans une tranchée creusée manuellement pour minimiser l'impact sur le milieu forestier. Au final, 15 espèces végétales ont été produites au cours de l'année 2014-2015 et une dizaine de celles-ci a été multipliée en quantité suffisante pour être disponible dès octobre 2015 pour des transplantations *in situ*.

RÉSULTATS

Ces résultats sont préliminaires : ils retracent les étapes qui ont permis de passer de la conception à l'application sur le terrain. Dans le cadre des expérimentations réalisées pour évaluer l'effet de l'hétérogénéité de la contamination du sol sur l'efficacité de la phytostabilisation des ETMM, une quinzaine d'individus de *Coronilla juncea* L., un sous-arbrisseau appartenant à famille des légumineuses, a été prélevé au printemps 2015 sur trois sites du PNCal (Heckenroth *et al.* 2015a). En accord avec les autorisations de prélèvements d'espèces non-protégées sur le territoire du PNCal impliquant un remplacement des individus prélevés, un protocole de transplantation de jeunes plants de *C. juncea* issus des multi-

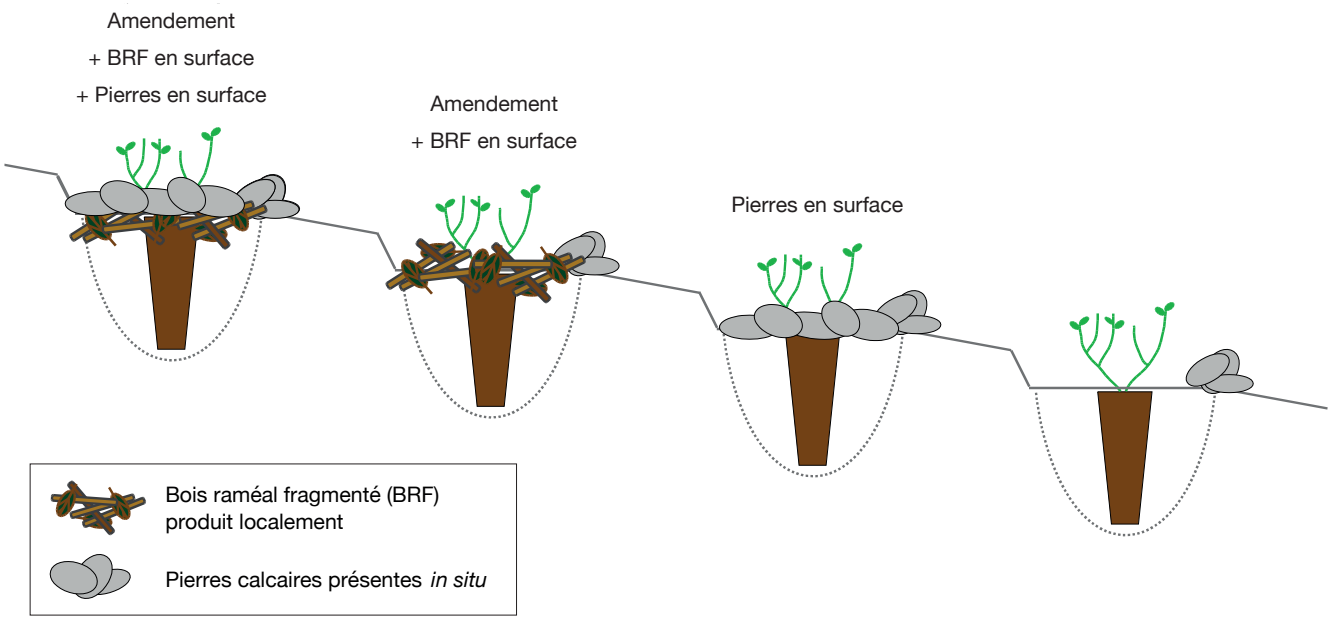


FIG. 3. — Représentation des différentes conditions expérimentales utilisées pour les transplantations de *Coronilla juncea* L. sur le terrain. Les traits en pointillés représentent le volume de sol remanié correspondant à trois fois le volume de la motte à planter, et mélangé à l'amendement organique dans les deux conditions expérimentales à gauche sur le schéma.

TABLEAU 2. — Concentrations en éléments traces métalliques et métalloïdes pseudo-totaux (moyenne ± écart-type, mg.kg^{-1} de matière séche) mesurées dans les sols de surface (0-10 cm) des sites de l'Escalette correspondant aux zones où les transplantations de *Coronilla juncea* L. ont été réalisées. Pour chaque élément, des lettres différentes indiquent des différences significatives de la moyenne dans une même colonne (Wilcoxon ; p-value ≤ 0,05). Abréviations : **Eh**, contamination forte des sites de l'Escalette (Escalette high) ; **El**, contamination moyenne des sites de l'Escalette (Escalette low) ; **S**, contamination à Sormiou.

	As (mg.kg^{-1})	Cu (mg.kg)	Pb (mg.kg^{-1})	Sb (mg.kg^{-1})	Zn (mg.kg^{-1})
Eh	5945 ± 1974 a	30.5 ± 9.9 ab	42320 ± 11251 a	2589 ± 829 a	10704 ± 4524 a
El	675 ± 262 b	23.7 ± 7.8 b	6286 ± 2811 b	202 ± 38 b	1767 ± 760 b
S	15,5 ± 3.5 c	15,9 ± 2,3 bc	90,9 ± 36,9 c	1,4 ± 1,31 c	105 ± 18,2 c

plications réalisées par le LPA, a été conçu afin de compenser l'impact des prélèvements. Ces transplantations ont aussi présenté une opportunité de tester des outils d'ingénierie écologique. Ainsi, les méthodes utilisées visent à favoriser l'établissement des plants dans un contexte méditerranéen et consistent notamment à créer des microsites favorables (Maestre *et al.* 2003 ; Cortina *et al.* 2011). En partenariat avec le LPA, nous avons choisi d'évaluer des matériaux présents sur place et un amendement organique compatible avec une démarche agroécologique. Ainsi, 60 plants de *C. juncea* (quatre plants pour un individu prélevé) ont été transplantés sur les terrains du PNCal entre septembre et octobre 2015 (Fig. 3). Des pierres calcaires présentes sur le site ont été disposées en aval de chaque plant pour limiter l'érosion du sol et des amendements utilisés (Fig. 3). Celles-ci ont également été utilisées comme recouvrement de surface dans certaines conditions expérimentales pour favoriser la rétention de l'humidité du substrat (Fig. 3). Les effets d'un amendement organique (mélange de guano et de tourteau de ricin pour l'agriculture biologique) et d'un mulch de bois raméal fragmenté (BRF) ont été évalués sur la capacité de reprise de croissance après transplantation des coronilles (Fig. 3). Le BRF est en effet connu pour favoriser le processus d'humification des sols (Tissaux 1996). Ce dernier est constitué d'un mélange d'essences natives des Calanques, produit sur site par le LPA pour valoriser les déchets issus de l'entretien de ses espaces verts.

Ces plants font l'objet d'un suivi afin d'évaluer l'effet des techniques d'ingénierie écologiques mises en place sur la reprise des individus dans des contextes de pollution différents. En effet, trois sites comprenant cinq réplicats ont fait l'objet de cette expérimentation : un site hot-spot de pollution en ETMM (Eh) et un site moyennement pollué en ETMM (El), localisés à proximité de la cheminée rampante de l'Escalette (Fig. 1), et comme référence, un site localisé à Sormiou (S), présentant un niveau de pollution en ETMM correspondant au bruit de fond sur le territoire du PNCal (Tableau 2). Les transplantations de *C. juncea* ont été réalisées sur des sites dont la contamination par les ETMM pseudo-totaux différait significativement dans les sols de surface (Tableau 2), selon l'ordre décroissant suivant : Eh > El > S.

Les premiers résultats de survie des individus de *C. juncea* montrent des tendances similaires mais un effet site marqué, notamment entre l'Escalette et Sormiou (Fig. 4).

Le suivi de la survie des plants de *C. juncea* a été réalisé pendant un an et cinq mois après les transplantations (Fig. 4).

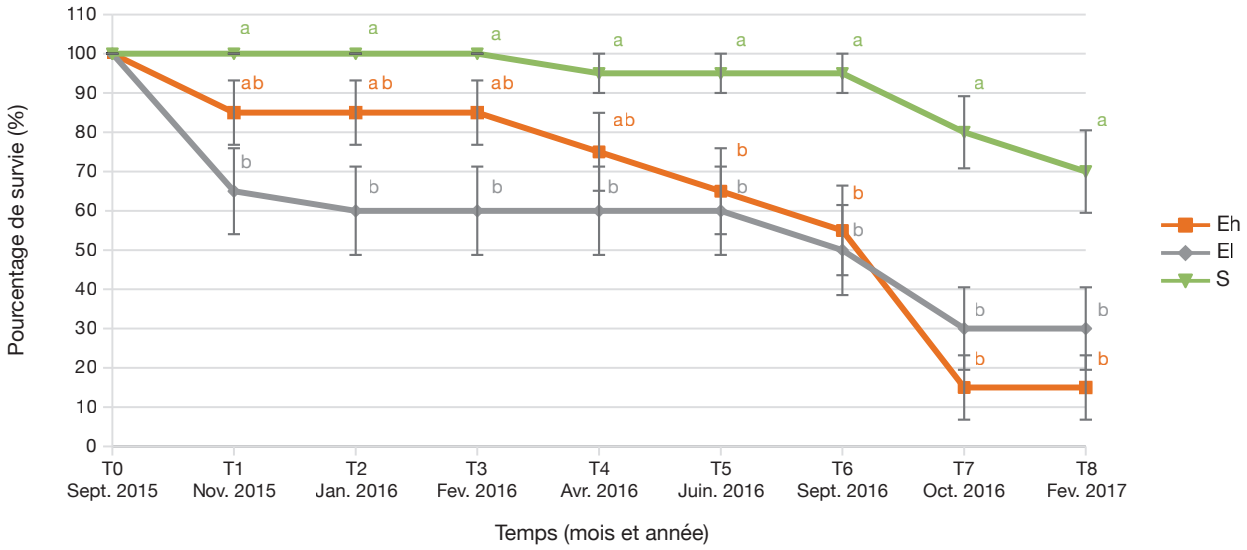


FIG. 4. — Évolution de la survie des individus de *Coronilla juncea* L. en fonction du temps sur les sites de l'Escalette (**Eh** et **El**) et de Sormiou (**S**) : moyenne ± erreur standard. Des lettres différentes indiquent des différences significatives de la moyenne (p-value ≤ 0,05).

Le site de Sormiou est celui qui présente les meilleurs taux de survie des plants tout au long de l'expérience, avec 95 % de survie après un an et 70 % en février 2017. Sur les sites de l'Escalette, les taux de survie ne diffèrent pas entre Eh et El (entre 50 et 55 % après un an et entre 15 et 30 % en février 2017 respectivement), mais suivent des tendances légèrement contrastées au cours du temps. La diminution du nombre d'individus entre septembre et octobre 2016 sur l'ensemble des sites traduit un prolongement du déficit de précipitation au-delà de la période estivale, particulièrement marquée en 2016. Sur le site Eh, après la perte de quelques individus juste après la transplantation, le taux de survie a été relativement stable et ne différait pas significativement de celui obtenu sur le site de Sormiou. Ce n'est qu'à partir du mois de juin, que le taux de survie est devenu significativement inférieur sur Eh, comparé à la référence (S), et équivalent à celui obtenu sur El. Sur ce dernier site, la perte en individus au début de l'expérience a été plus importante, avec un taux de survie significativement inférieur comparé à Sormiou, en novembre 2015, dû à une destruction des individus par des animaux (lapins et sangliers), cinq jours après la mise en place des placettes expérimentales.

DISCUSSION

Inadéquation des techniques conventionnelles de gestion des sites et sols pollués

Les techniques conventionnelles de dépollution des sites et sols pollués par les ETMM, essentiellement physico-chimiques, sont chères, lourdes à mettre en œuvre et peuvent créer des risques secondaires pour l'environnement (Fitz & Wenzel 2002) sur des milieux à priori déjà fragilisés. Elles sont donc peu adaptées à des sites à responsables défaillants où le budget public attribué à la dépollution sera limité et cela, d'autant plus pour de larges surfaces, ou encore pour des milieux à enjeux de conservation de la biodiversité et du paysage. De façon plus générale, ces méthodes sont assez éloignées des objectifs de développement durable de la loi Grenelle II, dans la mesure où elles se limitent souvent à considérer les sols pollués comme des déchets (générant excavation, destruction et/ou mise en décharge) en absence de réglementation européenne ou française sur le sol en tant que compartiment biologique (Desrousseaux 2011). Les techniques de phytoremédiation, phytotechnologies ou encore écotechnologies sont plus facilement applicables à de grandes surfaces d'un point de vue technico-financier. De plus, elles permettent de limiter les perturbations exercées par des actions de dépollution du sol sur le fonctionnement et l'intégrité des écosystèmes (Baker *et al.* 1994) et contribuent à l'amélioration de la qualité des sols pollués (Bert 2012). De fait, appliquées dans le cadre conceptuel de l'écologie de la restauration, les écotechnologies sont un outil pertinent pour la restauration écologique des écosystèmes contaminés (Wong 2003 ; Losfeld *et al.* 2015) notamment dans le contexte des aires protégées, en prenant soin de privilégier les regards croisés (Barthélémy & Souchon 2009).

Développement d'écotechnologies pour la gestion des terrains pollués du PNCal

Les enjeux de conservation des milieux naturels pollués des Calanques imposent donc des actions de gestion de la pollution du sol sous la forme d'une restauration écologique (SER 2004). Sur les anciens sites miniers notamment, la restauration écologique peut être employée pour améliorer les conditions physico-chimiques du substrat, nécessaires au retour d'un couvert végétal (Hobbs & Norton 1996). L'absence de couvert végétal aggrave en effet les phénomènes d'érosion des ETMM, notamment leur lessivage (Fig. 5) et contribue à leurs transferts hors site (Gray *et al.* 2006 ; Wilson & Pyatt 2007 ; MARSECO 2012). Dans le contexte méditerranéen, où les

conditions environnementales notamment liées à la xéricité contraignent naturellement les écosystèmes, les altérations physico-chimiques liées aux polluants peuvent accentuer les phénomènes d'érosion des sols. En effet, les sols contaminés, par l'érosion et les transferts dans le réseau trophique, deviennent à leur tour des sources de contamination pour les milieux alentours et peuvent ainsi causer des risques d'exposition importants pour les humains en fonction des usages du site (Basta & Gradwohl 1998 ; Gray *et al.* 2006 ; Clemente *et al.* 2012 ; Affholder *et al.* 2013). Sur les espaces naturels impactés par la pollution diffuse de l'Escalette, l'établissement d'un couvert végétal durable, favorisant les capacités de résilience de l'écosystème, est donc un facteur clé pour enrayer le cycle de dégradation des écosystèmes et réduire efficacement la dispersion des contaminants (Fig. 5) par des mécanismes de phytostabilisation.

Dans un contexte de sols oligotrophes et sous l'influence d'un climat méditerranéen aride, Padilla *et al.* (2009) ont observé des épisodes de mortalité marquée et obtenu environ 60 % de survie des plantules de *C. juncea* après le premier été suivant les transplantations, 40 % après le deuxième été et 35 % en septembre de la troisième année. La mortalité des plantules des jeunes arbustes méditerranéens sous l'influence du stress hydrique a été beaucoup étudiée, notamment en fonction de l'humidité du sol (Harrington 1991), de la longueur de la période de sécheresse (Maestre *et al.* 2003), et également sous l'influence des micro-conditions locales (Maestre *et al.* 2003 ; Cortina *et al.* 2011). Les taux de survie élevés obtenus sur Sormiou pourraient donc être liés à des micro-conditions locales plus favorables à l'établissement des plants qu'à l'Escalette (Fig. 4), mais potentiellement aussi aux techniques utilisées (Fig. 3). À l'inverse, la présence d'une forte contamination en ETMM à l'Escalette, en créant un stress supplémentaire lié à toxicité des ETMM sur les plantes et leurs microorganismes associés (Mendez & Maier 2008 ; Moreno-Jiménez *et al.* 2009 ; Regvar *et al.* 2010), pourrait expliquer l'épisode de mortalité plus important observé au cours de l'été 2016 (Fig. 4). De façon plus générale, les taux de survie obtenus, supérieurs puis égaux à 55 % un an après les transplantations (septembre 2016), sur l'ensemble des sites, pourraient suggérer une amélioration effective des micro-conditions locales par les aménagements réalisés pour les transplantations, notamment les mini-terrasses de culture (Fig. 3). Dans le cadre d'un déficit de précipitation marqué et sur des sites fortement contaminés, les résultats de survie ainsi obtenus dans le cadre de cette étude semblent prometteurs par rapport aux techniques d'ingénierie écologique utilisées. Cependant, il est nécessaire de réaliser un suivi des paramètres bio-physico-chimiques du sol et de la dynamique des communautés végétales à plus long terme, pour évaluer le rôle de *C. juncea* comme ingénieur de l'écosystème (Jones *et al.* 1994 ; Padilla & Pugnaire 2006).

De plus, il est à noter que la phytostabilisation n'est pas une méthode de dépollution au sens stricte dans la mesure où elle ne permet pas l'exportation des contaminants hors du site, mais elle correspond à un compromis qui permet une gestion écologique des sols pollués en ETMM, sans causer de pollution secondaire et/ou de destruction des milieux (Mench *et al.* 2009). En milieu méditerranéen pollué, la végétalisation de sites doit être réalisée avec des plantes adaptées aux conditions environnementales locales, ainsi qu'à des concentrations élevées en ETMM (Mendez & Maier 2008). Le choix d'espèces natives est donc essentiel pour garantir le succès d'une opération de phytostabilisation (Domínguez *et al.* 2008). Cette approche doit permettre de répondre à plusieurs objectifs comme la stabilisation des ETMM dans la rhizosphère, la capacité à se développer sur sol nu (espèces pionnières), l'amélioration de la fonctionnalité du sol (espèces facilitatrices), ainsi que le développement d'outils d'ingénierie écologique adaptés aux contraintes locales et facilitant l'établissement des plantes.

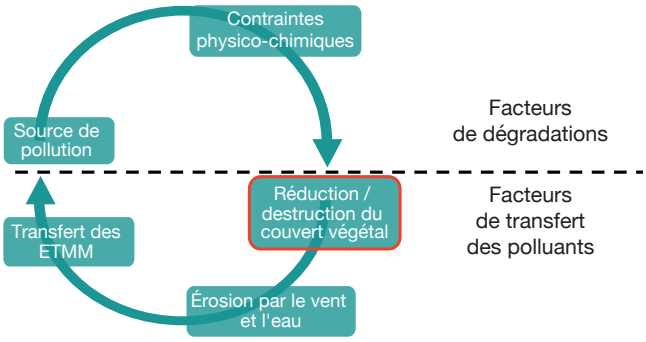


Fig. 5. — Illustration de l'amplification des effets de transfert des éléments traces métalliques et métalloïdes dans les milieux en absence de réhabilitation (inédit, conception A. Heckenroth d'après les travaux de Basta & Gradwohl 1998 ; Gray *et al.* 2006 ; Wilson & Pyatt 2007 ; Clemente *et al.* 2012 ; Affholder *et al.* 2013).

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES DE RESTAURATION ÉCOLOGIQUE DES TERRAINS POLLUÉS DU PNCAL

Premier bilan des transplantations de *Coronilla juncea* L.

Si le temps de suivi des individus transplantés de *C. juncea* est encore trop court pour observer une variabilité sur la survie et le développement des plants en fonction des différentes conditions expérimentales, la forte hétérogénéité environnementale, la stochasticité des perturbations, notamment animales, et les spécificités de chaque site semblent jouer un rôle prépondérant dans l'établissement des coronilles. Les résultats préliminaires sont toutefois encourageants quant à la capacité de transplanter des plantes natives et de créer des microsites favorables sous la forme de mini-terrasses de culture, homogènes à l'échelle des sites d'études. Ils questionnent également l'intérêt de réaliser des apports de matière organique sur ces sites oligotrophes, et suggèrent de miser plutôt sur des inoculations microbiennes pour favoriser la coopération plante-microorganismes dans des milieux perturbés. Il sera également intéressant de suivre le développement des individus de *C. juncea* à plus long terme, d'étudier quelles sont les dynamiques végétales qui se mettent en place à proximité des plants et si des évolutions de la qualité biologique et physico-chimique des sols sont observées, afin d'évaluer l'éventuel rôle de facilitation de cette espèce.



Fig. 6. — Illustration de *Plantago subulata* L. appartenant aux populations du littoral impactées par la pollution de l'Escalette et se développant sur un substrat contaminé en éléments traces métalliques et métalloïdes, composé en partie de scories et autres matériaux exogènes. Crédit photo : Alma Heckenroth.

Renforcement des communautés tolérantes aux ETMM sur un « hot-spot » de pollution

Les études menées ces dernières années sur les terrains naturels contaminés par l'ancienne fonderie de l'Escalette ont permis d'identifier une zone qualifiée de « hot-spot » de pollution en ETMM (Testiati *et al.* 2013 ; Affholder *et al.* 2014 ; Heckenroth *et al.* 2014, 2016b), directement influencée par les cendres et débris provenant de la cheminée rampante de l'usine (Fig. 1 et Tableaux 1 et 2). La caractérisation des communautés végétales présentes sur cette zone a abouti à une sélection d'espèces natives (Heckenroth *et al.* 2014, 2016b), qui ont depuis été multipliées hors site par le LPA. Des essais de restauration écologique ont été conduits dès novembre 2015 sur cette zone, en s'inspirant également des premiers retours d'expérience concernant les transplantations de *C. juncea*. L'objectif est de tester un ensemble de quatre espèces pérennes avec un consortium d'espèces végétales en variant les types d'assemblages pour identifier les cortèges floristiques les plus tolérants et les plus dynamiques pour fixer les sols pollués.

Restauration écologique des zones halophiles soumises à la pollution en ETMM

Les zones halophiles et halotolérantes soumises à la pollution de la friche industrielle de l'Escalette sont en partie concernées par l'action publique de gestion des dépôts principaux de scories menée par l'ADEME. Les forts enjeux de conservation de la biodiversité présents sur les zones côtières nécessitent cependant une approche de gestion des sols pollués qui n'impactent pas davantage un milieu déjà perturbé et vulnérable (Affre *et al.* 2015). De plus, les études de caractérisation de la végétation menées sur ces zones (Laffont-Schwob *et al.* 2011b ; Heckenroth *et al.* 2014, 2016b) ont mis en avant la co-ocurrence d'espèces protégées et de sol contaminé, voire de déchets industriels (Fig. 6). Ces zones devraient donc également faire l'objet d'essais de restauration écologique par des plantes natives tolérantes aux ETMM actuellement multipliées sur le site du LPA, dans le cadre d'une mission de restauration écologique des zones littorales menée par le PNCal. Cette approche, soutenue par les gestionnaires et combinée à des écotechnologies basées sur le potentiel de phytostabilisation des plantes natives, a notamment pour objectif de proposer aux décideurs publics une alternative écologique efficace pour la gestion des sites et sols pollués.

Les retours d'expérience sur cette première restauration expérimentale menée sur les sites soumis à des pollutions diffuses dans le PNCal devraient permettre de mieux guider les actions qui pourront être menées par la suite par le PNCal sur son territoire en lien avec les propriétaires. Un effort de conception de la filière de la production de plantes locales combiné aux outils de suivi de l'efficacité de stabilisation des polluants, pourront également apporter des éléments de réflexions pour d'autres sites contaminés méditerranéens à fort enjeu de conservation.

Remerciements

Ce projet de recherche fait l'objet d'un financement A*MIDEX (SynTerCalM n° ANR-11-IDEX-0001-02, 2014-2016) via le programme « Investissements d'Avenir » du gouvernement français, géré par l'Agence nationale de Recherche (ANR) et il a bénéficié du travail initié lors du projet ANR Marséco (CES 018) de 2008 à 2013. La réflexion menée ainsi que les résultats présentés sont issus du travail de thèse de doctorat d'Alma Heckenroth (2017) dans le cadre d'une convention CIFRE (2012/0175) entre l'ANRT et la société ORTEC générale de Dépollution (2012-2015). Nous remercions l'université d'Aix-Marseille pour avoir accordé un mois d'accueil en tant que professeur invité à Maria Isabel Sastre Conde du ministère de l'Agriculture des Baléares, et le CD13 pour nous avoir délivré une mise à disposition de terrains pour nos essais de restauration écologique. Les auteurs remercient également les rapporteurs de ce manuscrit pour leurs précieuses remarques.

RÉFÉRENCES

Affholder M. C., Prudent P., Masotti V., Coulomb B., Rabier J., Nguyen-The B. & Laffont-Schwob I. 2013. — Transfer of metals and metalloids from soil to shoots in wild rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) growing on a former lead smelter site: human exposure risk. *Science of the Total Environment* 454-455: 219-229. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.086

Affholder M. C., Pricop A. D., Laffont-Schwob I., Coulomb B., Rabier J., Boria A., Demelas C. & Prudent P. 2014. — As, Pb, Sb, and Zn transfer from soil to root of wild rosemary: do native symbionts matter? *Plant Soil* 382: 219-236. https://doi.org/10.1007/s11104-014-2135-4

Affre L., Dumas P. J., Dumas E., Laffont-Schwob I. & Tatoni T. 2015. — Regard écologique sur le recul stratégique : atouts et risques pour la diversité végétale péri-urbaine marseillaise. *VertigO–la revue électronique en sciences de l'environnement*

Hors-série 21, 13 p.
Aillaud G. J. & Crouzet A. 1988. — *Un milieu difficile, des plantes adaptées : la végétation littorale du Sud du golfe de Marseille*. Centre régional de Documentation pédagogique, Marseille, 50 p.
Ami D., Barthelemy C., Bonhomme P., Clayes C., Harmelin M., Le Mire Pecheux L., Ruitton S. & Tatoni T. 2013. — *Caractérisation de la fréquentation littorale et détermination d'indicateurs de vulnérabilité écologique pour définir des modes de gestion durable – Cas de la bande littorale du Parc national des Calanques (FHUVEL), LITEAU III,* MEDDT, 91 p.
Baker A. J. M., McGrath S. P., Sidoli C. M. D. & Reeves R. D. 1994. — The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants. *Resources, Conservation and Recycling,* 11 (1-4): 41-49. https://doi.org/10.1016/0921-3449(94)90077-9
Barthélémy C. 2016. — La prise en charge publique contemporaine des sites pollués dans les Calanques, *in* Daumalin X. & Laffont-Schwob I. (éds), *Les Calanques marseillaises industrielles : une histoire au présent*. Territoires contemporains, REF. 2C éditions, Aix-en-Provence, 250-285.
Barthélémy C. & Souchon Y. 2009. — La restauration écologique du fleuve Rhône sous le double regard du sociologue et de l'écologue. *Natures Sciences Sociétés*, 17: 113-121. https://doi.org/10.1051/nss/2009025
Basta N. T. & Gradwohl R. 1998. — Remediation of heavy metal-contaminated soil using rock phosphate. *Better Crops* 82 (4): 29-31.
Bert V. 2012. — *Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués. État de l'art et guide de mise en œuvre.* Éditions EDP Sciences / ADEME / INERIS, 86 p.
Clemente R., Walker D. J., Pardo T., Martínez-Fernández D. & Pilar Bernal M. 2012. — The use of halophytic plant species and organic amendments for the remediation of a trace elements-contaminated soil under semi-arid conditions. *Journal of Hazardous Materials* 223-224: 63-71. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.04.048
Cortina J., Amat B., Castillo V., Fuentes D., Maestre F. T., Padilla F. M. & Rojo L. 2011. — The restoration of vegetation cover in the semi-arid Iberian southeast. *Journal of Arid Environments* 75: 1377-1384. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.08.003
Crouzet A. 1975. — Contribution à l'étude linéaire de la végétation littorale du cap Croisette (Marseille) : répartition, phénologie, morphologie et anatomie de quelques espèces en relation avec certaines conditions du milieu. *I.* Pedo-ecologie. II. Microclimatologie. *Bulletin du Muséum d'Histoire naturelle de Marseille* 35: 103-48.
Daumalin X. 2006. — Industrie et environnement en Provence sous l'Empire et la Restauration. *Rives méditerranéennes* 1 (23): 27-46. http://rives.revues.org/522, dernière consulation le 6 juin 2017.
Daumalin X. & Raveux O. 1999. — Le raffinage du sucre, l'huilerie et la métallurgie : trois branches emblématiques de la Révolution industrielle à Marseille. *Industries en Provence*, Mémoire, Industrie, Provence (MIP), Marseille 4: 3-9.
Darmendrail D., Baize D., Barbier J., Freyssinet P., Mouvet C., Salpéteur I. & Wavrer, P. 2000. — *Fond géochimique naturel. État des connaissances à l'échelle nationale*. Brgm report RP-50518-Fr. Orleans, France, 95 p.
Desrousseaux M. 2011. — *La réglementation internationale, européenne et nationale relative aux sols : Vers la reconnaissance des sols comme milieu naturel ?* Actes du XIII colloque régional de l'association Eau et Rivières de Bretagne, colloque 2011, « L'eau et les sols », Pontivy, 6p. http://www.eau-et-rivieres.asso.fr/media/user/File/PDF/Actes-colloque-sols-2011.pdf, dernière consulation le 6 juin 2017.
Dominguez M. T., Maranon T., Murillo J. M., Schulin R. & Robinson B. H. 2008. — Trace element accumulation in woody plants of the Guadiamar Valley, SW Spain: a large-scale phytomanagement case study. *Environmental Pollution* 152: 50-59. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.05.021
Fitz W. J. & Wenzel W. W. 2002. — Arsenic transformations in the soil-rhizosphere-plant system : fundamentals and potential application to phytoremediation. *Journal of Biotechnology* 99: 259-278. https://doi.org/10.1016/S0168-1656(02)00218-3
Gallimard R. 2000. — Réhabilitation des friches industrielles et zones d'activités à Marseille. *Rives Méditerranéennes* 4: 25-34. https://rives.revues.org/74 dernière consulation le 6 juin 2017.
Garnier J. & Zimmermann J.-B. 2006. — Industrial territories in Marseilles Metropolitan Area. *Géographie, Economie, Société* 8: 215-238.
Giovannelli G., Bonasoni P., Loglio G., Ricci C., Tesei U. & Cini R. 1988. — Evidence of anionic-surfactant enrichment in marine aerosol. *Marine Pollution Bulletin* 19 (6): 274-277. https://doi.org/10.1016/0025-326X(88)90598-X
Glick B. R. 2003. — Phytoremediation: synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment. *Biotechnology Advances* 21: 383-393. https://doi.org/10.1016/S0734-9750(03)00055-7
Gray C. W., Dunham S. J., Dennis S. J., Zhao F. J. & McGrath S. P. 2006. — Field evaluation of in situ remediation of a heavy metal contaminated soil using lime and red-mud. *Environmental Pollution* 142: 530-539. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.10.017
Harrington G. N. 1991. — Effects of soil moisture on shrub seedling survival in semi-arid grassland. *Ecology* 71 (3): 1138-1149. https://doi.org/10.2307/1940611
Heckenroth A. 2017. — *Évaluation des méthodes de phytostabilisation adaptées à la restauration écologique d'une friche industrielle incluse dans une zone protégée – cas de l'usine de l'Escalette dans la zone cœur du parc national des Calanques.* Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille, Marseille, 286 p.
Heckenroth A., Rabier J. & Laffont-Schwob, I. 2014. — Using local biodiversity to prevent pollution transfers to environmental components of a Mediterranean semi-arid ecosystem. *EGU General Assembly Conference Abstracts* 16: 15333.
Heckenroth A., Verlande M., Le Croller M., Prudent P., Rabier J. & Lafont-Schwob I. 2015a. — In situ *Assessment of Natural Phytostabilization Capacities of two Mediterranean Plant Species under High Metal and Metalloid Contamination.* Communication écrite, SER 2015, 6th World Conference on Ecological Restoration, Manchester, UK.
Heckenroth A., Rabier J., Prudent P., Monsara P., Le Mire-Pécheux L. & Lafont-Schwob I. 2015b. — *Development of Ecotechnologies for Ecological Management of Diffuse Pollution and Restoration of Polluted Areas in the Calanques Natonal Park (France).* Communication écrite, SER 2015, 6th World Conference on Ecological Restoration, Manchester, UK.
Heckenroth A., Prudent P., Rabier J., Monsara P., Desrousseaux M. & Laffont-Schwob I. 2016a. — Vers quelles solutions écologiques aux pollutions diffuses ? *in* Daumalin X. & Laffont-Schwob I. (éds), *Les Calanques marseillaises industrielles : une histoire au présent*. Territoires contemporains, REF. 2C éditions, Aix-en-Provence, 286-323.
Heckenroth A., Rabier J., Dutoit T., Torre F., Prudent P. & Laffont-Schwob I. 2016b. — Selection of native plants with phytoremediation potential for highly contaminated Mediterranean soil restoration: Tools for a non-destructive and integrative approach. *Journal of Environmental Management* 183 (3): 850-863. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.029
Hobbs R. J. & Norton D. A. 1996. — Towards a conceptual framework for restoration ecology. *Restoration ecology* 4 (2): 93-110. https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.1996.tb00112.x
InVS-DRASS 2005. — *Synthèse de l'évaluation des risques sanitaires relative à la contamination environnementale du littoral*

sud de Marseille (Montredon – Callelongue), Marseille, 5 p.
Janoušková M., Pavlikova D. & Vosatka M. 2006. — Potential contribution of arbuscular mycorrhiza to cadmium immobilisation in soil. *Chemosphere* 65: 1959-1965. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.07.007
Jones C. G., Lawton J. H. & Shachak M. 1994. — Organisms as ecosystem engineers. *Oikos* 69: 373-386. https://doi.org/10.2307/3545850
Knoerr A. 1959. — Le milieu, la flore, la végétation, la biologie des halophytes, dans l'archipel de Riou et sur la côte Sud de Marseille. *Bulletin du Muséum d'Histoire naturelle de Marseille* 20: 89-173.
Laffont-Schwob I., d'Enjoy-Weinkammerer G., Pricop A., Prudent P., Masotti V. & Rabier J. 2011a. — Evaluation of a potential candidate for heavy metal phytostabilization in polluted sites of the Mediterranean littoral (SE Marseille): endomycorrhizal status, fitness biomarkers and metal content of *Atriplex halimus* spontaneous populations. *Ecological Questions* 14 (1): 89. https://doi.org/10.12775/v10090-011-0025-4
Laffont-Schwob I., Dumas P.-J., Pricop A., Rabier J., Miché L. Affre L., Masotti V., Prudent P. & Tatoni T. 2011b. — Insights on metal-tolerance and symbionts of the rare species Astragalus tragacantha aiming at phytostabilization of polluted soils and plant conservation. *Ecologia Mediterranea* 37 (2): 57-62.
Laffont-Schwob I., Heckenroth A., Rabier J., Masotti V., Oursel B. & Prudent P. 2016. — Une pollution présente diffuse et étendue, *in* Daumalin X. & Laffont-Schwob I. (éds), *Les Calanques marseillaises industrielles : une histoire au présent.* Territoires contemporains, REF. 2C éditions, Aix-en-Provence, 204-249.
Li M. S. 2006. — Ecological restoration of mineland with particular reference to the metalliferous mine wasteland in China: A review of research and practice. *Science of the Total Environment* 357: 38-53. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.05.003
Loglio G., Degli Innocenti N., Gellini R., Pantani F. & Cini R. 1989. — Detergents as a condition of pollution from coastal marine aerosol. *Marine Pollution Bulletin* 20: 115-119. https://doi.org/10.1016/0025-326X(88)90815-6
Losfeld G., L'Huiller L., Fogliani B., Jaffré T. & Grison C. 2015. — Mining in New Caledonia: environmental stakes and restoration opportunities. *Environmental Science and Pollution Research International* 22(8): 5592-5607. https://doi.org/10.1007/s11356-014-3358-x
Maestre F. T., Cortina J., Bautista S., Bellot J. & Vallejo V. R. 2003. — Small-scale environmental heterogeneity and spatio-temporal dynamics of seedling establishment in a semiarid degraded ecosystem. *Ecosystems* 6: 630-643. https://doi.org/10.1007/s10021-002-0222-5
MARSECO 2012. — Biodiversité et pollution en zone littorale marseillaise : comprendre les risques pour les écosystèmes et l'homme. *Les cahiers de l'ANR-Contaminants et environnements : constater, diffuser, decider* 6: 94.
Mench M., Schwitzguébel J. P., Schroeder P., Bert V., Gawronski S. & Gupta S. 2009. — Assessment of successful experiments and limitations of phytotechnologies: contaminants uptake, detoxification and sequestration, and consequences for food safety. *Environmental Science and Pollution Research* 16: 876-900. https://doi.org/10.1007/s11356-009-0252-z
Mench M., Lepp N., Bert V., Schwitzguébel J. P., Gawronski S. W., Schröder P. & Vangronsveld J. 2010. — Successes and limitations of phytotechnologies at field scale: outcomes, assessment and outlook from COST Action 859. *Journal of Soils Sediments* 10: 1039-1070. https://doi.org/10.1007/s11368-010-0190-x
Mendez M. O. & Maier R. M. 2008. — Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments – An emerging remediation technology. *Environmental Health Perspectives* 16 (3): 278-283. https://doi.org/10.1289/ehp.10608
Molinier R. 1934. — Études phytosociologiques et écologiques en Provence occidentale. *Annales du Musée d'Histoire naturelle de Marseille* 27: 1-274.
Moreno-Jiménez E., Esteban E., Carpena-Ruiz R. O. & Peñalosa J. M. 2009. — Arsenic- and mercury-induced phytotoxicity in the Mediterranean shrubs *Pistacia lentiscus* and *Tamarix gallica* grown in hydroponic culture. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 72: 1781-1789. https://doi.org/110.1016/j.ecoenv.2009.04.022
Norland M. R. & Veith D. L. 1995. — Revegetation of coarse taconite iron ore tailing using municipal waste compost. *Journal of Hazardous Materials* 41: 123-134. https://doi.org/10.1016/0304-3894(94)00115-W
Padilla F. M. & Pugnaire F. I. 2006. — The role of nurse plants in the restoration of degraded environments. *Frontiers in Ecology and the Environment* 4: 196-202. https://doi.org/10.1890/1540-9295(2006)004[0196:TRONPI]2.0.CO;2
Padilla F. M., Ortega R., Sànchez J. & Pugnaire F. I. 2009. — Rethinking species selection for restoration of arid shrublands. *Basic and Applied Ecology* 10: 640-647. https://doi.org/10.1016/j.baae.2009.03.003
Pilon-Smits E. 2005. — Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology* 56: 15-39. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214
Piñeiro J., Maestre F. T., Bartolomé L. & Valdecantos A. 2013. — Ecotechnology as a tool for restoring degraded drylands: A meta-analysis of field experiments. *Ecological Engineering* 61: 133-144. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.09.066
PLU - Plan Local d'Urbanisme de la commune de Marseille. 2010. — *Règlement.* Ville de Marseille, Marseille Provence Métropole Communauté Urbaine, 546 p.
Quézel P. & Médail F. 2003. — *Écologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen*. Éditions Elsevier, Paris. 576 p.
Rabier J., Laffont-Schwob I., Pricop A., Ellili A., D'Enjoy-Weinkammerer G., Salducci M. D., Prudent P., Lotmani B., Tonetto A. & Masotti V. 2014. — Heavy metal and arsenic resistance of the halophyte *Atriplex halimus* L. along a gradient of contamination in a French Mediterranean spreay zone. *Water Air Soil Pollut* 225: 1993. https://doi.org/10.1007/s11270-014-1993-y
Redon P. O., Béguiristain T. & Leyval C. 2009. — Differential effects of AM fungi isolates on Medicago trunculata growth and metal uptake in a multimetallic (Cd, Zn, Pb) contaminated agricultural soil. *Mycorrhiza* 19: 187-195. https://doi.org/10.1007/s00572-009-0230-9
Regvar M., Likar M., Piltaver A., Kugonic N. & Smith J. E. 2010. — Fungal community structure under goat willows (*Salix caprea* L.) growing at metal polluted site: the potential of screening in a model phytostabilisation study. *Plant Soil* 330: 345-356.
Rey F., Gosselin F. & Doré A. 2014. — *Ingénierie écologique, action par et/ou pour le vivant ?* Éditions Quae, France, 174 p.
Rivera-Becerril F., Calantzis C., Turnau K., Caussanel J. P., Belimov A. A., Gianinazzi S., Strasser R. J. & Gianinazzi-Pearson V. 2002. — Cadmium accumulation and buffering od cadmium-induced stress by arbuscular mycorrhiza in three *Pisum sativum* L. genotypes. *Journal wof Experimental Botany* 53 (371): 1177-1185. https://doi.org/10.1093/jexbot/53.371.1177
SER 2004. — The SER International Primer on Ecological Restoration / Abécédaire de la SER sur la restauration écologique. Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group, Tucson, 15 p.
Sigoillot J. C. 1987. — *Dispersion et dégradation bactérienne des tensioactifs dans les eaux littorales.* Thèse de l'Université d'Aix-Marseille III, Marseille, 206 p.

SPPPI-PACA 2006. — *Commission plénière*. Secrétariat Permanent à la Prévention des Pollutions industrielles Provence-Alpes-Côte-d'Azur, Marseille, 25 p.

Testiati E., Parinet J., Massiani C., Laffont-Schwob I., Rabier J., Pfeifer H.-R., Lenoble V., Masotti V. & Prudent P. 2013. — Trace metal and metalloid contamination levels in soils and native plant species of a former industrial site: evaluation of the phytostabilization potential. *Journal of Hazardous Material* 248-249: 131-141. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.12.039

Tissaux J. C. 1996. — *Une revue bibliographique des principaux mécanismes pédogénétiques pour caractériser le rôle du bois raméal fragmenté (BFR) dans le processus d'humification.* Mémoire de fin d'étude, publication n°60, Groupe de Coordination sur les Bois raméaux, Université de Laval, Québec, 38 p.

Vangronsveld J., Herzig R., Weyens N., Boulet J., Adriaensen K., Ruttens A., Thewys T., Vassilev A., Meers E., Nehnevajova E., Van Der Lelie D. & Mench M. 2009. — Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field. *Environmental Science and Pollution Research* 16: 765-794. https://doi.org/10.1007/s11356-009-0213-6

Wilson B. & Pyatt F. B. 2007. — Heavy metals dispersion, persistence, and bioaccumulation around an ancient copper mine situated in Anglesey, UK. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 66: 224-231. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2006.02.015

Wong M. H. 2003. — Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere* 50: 775-780. https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00232-1

Soumis le 24 octobre 2016;
accepté le 18 mars 2017;
publié le 28 juin 2017.

ANNEXE 1. — Glossaire.

Écotechnologies : les écotechnologies sont des outils ou techniques incluant les systèmes vivants et qui consistent à mimer ou à utiliser des processus naturels pour résoudre des problèmes environnementaux et de sociétés, tout en maintenant les fonctions écosystèmiques (Piñeiro *et al.* 2013).

Habitat phrygane : formation végétale rare thermoxérophile méditerranéenne exposée aux vents de mer chargés d'embruns, en coussinets épineux plus ou moins épars, caractérisée par une répartition très morcelée et restreinte. Sur le littoral du Parc national des Calanques, la phrygane est répartie selon une zonation en « bandes » de moins de 100 m de largeur sur près de 10 km de trait de côte et distribuée de manière éparse sur les archipels marseillais. Elle est caractérisée par la présence de trois espèces végétales structurantes qui possèdent des optima de niches légèrement différents mais occupent globalement une position intermédiaire sur le gradient de salinité entre la zone d'espèces halophiles et la zone de garrigue littorale. Ces espèces sont *Astragalus tragacantha* L., *Thymelaea tartonraira* (L.) (protection nationale, VU-UICN FR) et *Plantago subulata* L. (protection régionale, LC-UICN FR) (*Astragalo-plantaginetum subulatae* ; code Natura 2000 EUR27 : 5410-1, https://inpn.mnhn.fr/habitat/cd_hab/8982).

Halophile : ce caractère peut être attribué aux plantes qui ne peuvent se développer complètement qu'en présence de fortes concentrations salines (salicornes par exemple, *Salicornia* sp.).

Halotolérante : ce caractère peut être attribué aux plantes qui, bien que pouvant tolérer d'importantes accumulations de sels dans le milieu extérieur, se comportent normalement sur des sols non salés (certaines espèces du genre *Atriplex* L.).

Ingénierie écologique : l'ingénierie écologique est définie comme l'ensemble des procédés par et/ou pour le vivant qui utilisent les connaissances écologiques pour répondre à des objectifs de conservation des milieux et de la biodiversité, de création, restauration ou gestion des milieux naturels ou anthropisés (Rey *et al.* 2014).

Phytoremédiation : la phytoremédiation regroupe l'ensemble des procédés qui utilisent les plantes et leurs microorganismes associés pour extraire, contenir, inactiver ou dégrader les contaminants en milieux terrestres ou aquatiques (Pilon-Smits 2005 ; Vangronsveld *et al.* 2009 ; Bert 2012).

Phytostabilisation : la phytostabilisation est un procédé de phytoremédiation qui utilise le couvert végétal pour réduire efficacement la biodisponibilité et la mobilité de polluants inorganiques dans les sols. Dans le cas des ETMM, la phytostabilisation permet de réduire les transferts de polluants via deux mécanismes principaux :

– la protection physique du sol contre l'érosion en réduisant ainsi la dispersion des ETMM (Norland & Veith 1995 ; Li 2006 ; Mendez & Maier 2008) ;

– l'action combinée des racines, de leurs exsudats et des microorganismes associés pour stabiliser les polluants dans les parties racinaires et la rhizosphère (Rivera-Becerril *et al.* 2002 ; Glick 2003 ; Janoušková *et al.* 2006 ; Redon *et al.* 2009 ; Mench *et al.* 2010).

Restauration écologique : la restauration écologique est la discipline qui consiste à assister le rétablissement d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit (SER 2004).

Thermoxérophile : se dit d'une plante qui se développe sur des milieux chauds et secs.

Xéricité : ensemble des paramètres qui caractérisent la sécheresse d'un milieu, notamment climatiques et pédologiques (pluviométrie, épaisseur du sol, pente, exposition, etc.).

Couverture : mise en place de placettes expérimentales de restauration écologique des communautés végétales natives (au premier plan) sur un « hot-spot » de pollution. Crédit photo : IMBE-Vanina-Beauchamps-Assali.