

Comment allier stabilisation des sols contaminés et préservation d'Astragalus tragacantha L. sur le littoral remarquable du Parc national des Calanques ?

Alma Heckenroth, Isabelle Laffont-Schwob, Teddy Baumberger, Pascale Prudent, Lidwine Le Mire Pecheux, Laureen Keller, Alex Baumel, Estelle Dumas, L Miche, Thierry Tatoni, et al.

▶ **To cite this version:**

Alma Heckenroth, Isabelle Laffont-Schwob, Teddy Baumberger, Pascale Prudent, Lidwine Le Mire Pecheux, et al.. Comment allier stabilisation des sols contaminés et préservation d'Astragalus tragacantha L. sur le littoral remarquable du Parc national des Calanques ?. Naturae, 2022, 3, pp.31-41. 10.5852/naturae2022a3 . hal-03567306

HAL Id: hal-03567306
https://hal.science/hal-03567306

Submitted on 22 Feb 2022

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

2022 • 3

REVER 10 – 10E COLLOQUE DU RÉSEAU D'ÉCHANGE ET DE VALORISATION EN ÉCOLOGIE DE LA RESTAURATION

PARIS, 19-21 MARS 2019

Édité par Philippe GOURDAIN

Comment allier stabilisation des sols contaminés et préservation d'*Astragalus tragacantha* L. sur le littoral remarquable du Parc national des Calanques ?

Alma HECKENROTH, Isabelle LAFFONT-SCHWOB, Teddy BAUMBERGER, Pascale PRUDENT, Lidwine LE MIRE-PECHEUX, Laureen KELLER, Alex BAUMEL, Estelle DUMAS, Lucie MICHÉ, Thierry TATONI, Pascal MIRLEAU & Laurence AFFRE



art. 2022 (3) — Publié le 9 février 2022
www.revue-naturae.fr

OFB OFFICE FRANÇAIS DE LA BIODIVERSITÉ

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

MUSÉUM NAL HIST NATURELLE

Directeur de la publication / *Publication director*: 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)
Patrick De Wever (MNHN, Paris)
Thierry Dutoit (UMR CNRS IMBE, Avignon)
Éric Feunteun (MNHN, Dinard)
Romain Garrouste (MNHN, Paris)
Grégoire Gautier (DRAAF Occitanie, Toulouse)
Olivier Gilg (Réserves naturelles de France, Dijon)
Frédéric Gosselin (Irstea, Nogent-sur-Vernisson)
Patrick Haffner (PatriNat, Paris)
Frédéric Hendoux (MNHN, Paris)
Xavier Houard (OPIE, Guyancourt)
Isabelle Le Viol (MNHN, Concarneau)
Francis Meunier (Conservatoire d'espaces naturels – Hauts-de-France, Amiens)
Serge Muller (MNHN, Paris)
Francis Olivereau (DREAL Centre, Orléans)
Laurent Poncet (PatriNat, Paris)
Nicolas Poulet (OFB, Vincennes)
Jean-Philippe Siblet (PatriNat, Paris)
Laurent Tillon (ONF, Paris)
Julien Touroult (PatriNat, Paris)

Couverture / *Cover*:
Repérage des sites potentiels de transplantation (novembre 2019) sur le littoral sur Parc national des Calanques. Crédit photo: Maxime Berenger.

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

Les Publications scientifiques du Muséum publient aussi / *The Museum Science Press also publish:*
Adansonia, Zoosystema, Anthropozoologica, European Journal of Taxonomy, Geodiversitas, **Cryptogamie sous-sections** ***Algologie, Bryologie, Mycologie, Comptes Rendus Palevol.***

Diffusion – Publications scientifiques Muséum national d'Histoire naturelle
CP 41 – 57 rue Cuvier F-75231 Paris cedex 05 (France)
Tél.: 33 (0)1 40 79 48 05 / Fax: 33 (0)1 40 79 38 40
diff.pub@mnhn.fr / https://sciencepress.mnhn.fr

© Publications scientifiques du Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 2022
ISSN (électronique / *electronic*): 1638-9387

Comment allier stabilisation des sols contaminés et préservation d'*Astragalus tragacantha* L. sur le littoral remarquable du Parc national des Calanques ?

Alma HECKENROTH
Isabelle LAFFONT-SCHWOB
Aix-Marseille Université, IRD, Laboratoire Population Environnement Développement,
case 10, 3 place Victor Hugo, CS80249, F-13331 Marseille, Cedex 03 (France)
alma.heckenroth@univ-amu.fr
isabelle.schwob@univ-amu.fr

Teddy BAUMBERGER
Société EcoStat, 16 chemin des croix du haut, F-83630 Baudinard-sur-Verdon (France)
teddybaumberger@gmail.com

Pascale PRUDENT
Aix-Marseille Université, CNRS, LCE, Laboratoire de Chimie de l'Environnement,
Case 29, CS80249 - Saint Charles, 3 place Victor Hugo, F-13003 Marseille (France)
pascale.prudent@univ-amu.fr

Lidwine LE MIRE-PECHEUX
Laureen KELLER
Parc national des Calanques,
141 avenue du Prado, Bâtiment A, F-13008 Marseille (France)
lidwine3@yahoo.fr
laureen.keller@calanques-parcnational.fr

Alex BAUMEL
Estelle DUMAS
Lucie MICHÉ
Thierry TATONI
Pascal MIRLEAU
Laurence AFFRE
Aix-Marseille Université, CNRS, IRD, Avignon Université,
Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie Marine et Continentale
Faculté des Sciences et Techniques de Saint-Jérôme,
case 421, F-13397 Marseille, cedex 20 (France)
alex.baumel@imbe.fr
estelle.dumas@imbe.fr
lucie.miche@imbe.fr
thierry.tatoni@imbe.fr
pascal.mirleau@imbe.fr
laurence.affre@imbe.fr

Soumis le 14 mai 2020 | Accepté le 9 octobre 2021 | Publié le 9 février 2022

Heckenroth A., Laffont-Schwob I., Baumberger T., Prudent P., Le Mire-Pecheux L., Keller L., Baumel A., Dumas E., Miché L., Tatoni T., Mirleau P. & Affre L. 2022. — Comment allier stabilisation des sols contaminés et préservation d'*Astragalus tragacantha* L. sur le littoral remarquable du Parc national des Calanques ?, *in* Gourdain P. (éd.), REVER 10 – 10e Colloque du Réseau d'Échange et de Valorisation en Écologie de la Restauration, Paris, 19-21 mars 2019. *Naturae* 2022 (3): 31-41. https://doi.org/10.5852/naturae2022a3

RÉSUMÉ
Face à la dégradation anthropique des habitats littoraux du Parc national des Calanques, le projet européen LIFE Habitats Calanques (LIFE16 NAT/FR/000593) a pour objectif d'entreprendre des actions de protection et de restauration écologique à grande échelle. Parmi ces habitats, la phrygane (code Natura 2000 : 5410) représente un exemple typique d'une situation littorale contrainte par une forte anthropisation et des conditions climatiques drastiques. Cet habitat est structuré par l'Astragale de Marseille (*Astragalus tragacantha* L.), une espèce végétale rare et protégée dont ses populations sont vulnérables, notamment à la fragmentation et aux embruns pollués. Cependant, cette espèce tolère des concentrations édaphiques élevées d'éléments traces métalliques et métalloïdes (ETMM) issus d'activités industrielles passées. Des études précédentes ont caractérisé des symbioses racinaires typiques de *A. tragacantha* (endomycorhizes à arbuscules et nodules à rhizobium) pouvant expliquer sa capacité à tolérer les stress hydrique et nutritif ainsi que la contamination des sols. Dans la présente étude, sur la base d'une carte d'occupation des sols, la modélisation de la probabilité de présence d'*A. tragacantha* selon l'altitude, la pente et l'exposition a permis d'identifier plusieurs zones favorables à son développement. Sur ces zones, la contamination en ETMM a été analysée. Ces travaux complémentaires permettent d'envisager la restauration des populations d'*A. tragacantha* par transplantation de plantules, soit en renforcement des populations existantes, soit en les introduisant dans de nouveaux sites favorables afin d'augmenter la connectivité entre populations. Cette opération de restauration permettra également de favoriser la phytostabilisation des ETMM et participera à la refonctionnalisation des sols contaminés.

MOTS CLÉS
Espèce ingénieur, phytostabilisation, symbioses racinaires, transplantations de plantules.

ABSTRACT
Towards the ecological restoration of the remarkable coastline of the Calanques National Park : combining stabilization of contaminated soils with Astragalus tragacantha *L. conservation.*
Facing the anthropic degradation, the European project Life Habitats Calanques aims to undertake the protection and ecological restoration of the remarkable littoral habitats of the Calanques National Park (PNCal) at a large scale. Among protected but degraded habitats of the PNCal, the "astragalus phrygana" account for a typical example of a littoral situation constrained by increasing anthropization and drastic climatic conditions. The population of *Astragalus tragacantha* L. (Fabaceae), a rare and protected species, are particularly vulnerable to trampling and to polluted sea sprays that threaten its habitat. However, thanks to its root symbiosis, this species tolerates hydric and nutritional stress as well as high concentrations of soil trace metals and metalloids (TMM) from former industrial activities. Based on the fine mapping of soil occupancy, the modelization of *A. tragacantha* presence have allowed to propose 11 favourable areas that could be used for reinforcement and/or reintroduction of *A. tragacantha* in the Calanques national Park. The TMM soil contamination was highly heterogeneous and diffuse across the sites but considered as not constraining for the plant grow. To optimize the success of the *A. tragacantha* population restoration, the strategy of *ex situ* seeds culture followed by seedlings translocation appeared better compared to seed-based translocation strategy. *Ex situ* controlled experiments showed the ability to form root symbioses in contaminated soils and to accumulate preferentially TMM in root parts which highlight the phytostabilization potential of this plant species. It is now possible to consider restoring the *A. tragacantha* populations by way of seedlings transplantation together with their root symbionts, either by reinforcement of existing populations, or by introduction in new favorable sites in order to increase the connectivity of its populations. Furthermore, such restoration approach will be also favorable to TMM phytostabilization and the re-functionalization of contaminated soils of the remarkable littoral habitats of the Calanques National Park (PNCal).

KEY WORDS
Engineer species, phytostabilisation, root symbioses, seedling transplantations.

INTRODUCTION

Le littoral concentre des activités multiples et parfois antagonistes en termes d'enjeux environnementaux dont la gestion relève d'un véritable défi (Kalaora 2010). Ce territoire biologiquement très riche avec de nombreuses espèces rares (Benoît & Comeau 2005 ; Merckelbagh 2009) est aussi un lieu où la densité des populations humaines est en constant accroissement, entraînant un taux élevé d'artificialisation – appelé « littoralisation ». Ce phénomène menace de perte ou de fragmentation les nombreux habitats côtiers d'intérêt communautaire, également sensibles aux espèces invasives et aux pollutions d'origine anthropique. Dans ce contexte, le littoral péri-urbain aux portes de la mégapole marseillaise représente un exemple typique de cette situation paradoxale aux enjeux multiples du fait des caractéristiques suivantes :

– typicité de stress abiotiques : vents violents, salinité et xéricité extrêmes, quasi-absence de sol, sol oligotrophe ;



Fig. 1. — Partie aérienne d'*Astragalus tragacantha* L. Crédit photo : Alma Heckenroth.

– taux élevé d'espèces rares/endémiques à statut de protection national ou local et présence d'habitats à statuts de conservation et réglementaires au niveau européen ;

– pression anthropique forte du fait de son insertion dans le tissu urbain d'une métropole de plus de 1,8 millions d'habitants (dont près de 50 % résident à Marseille, INSEE 2020) ;

– contaminations organiques et inorganiques notoires des sols, des eaux et des embruns ;

– fort attachement et appropriation ancienne par les usagers locaux (Clayes *et al.* 2014).

Le littoral péri-urbain marseillais a ainsi été identifié dans la charte du Parc national des Calanques (PNCal) comme une zone atelier prioritaire. Ainsi, un projet LIFE Habitats Calanques (LIFE16 NAT/FR/000593, 2017-2022) a été lancé afin de mener à grande échelle des actions de restauration écologique des habitats littoraux dégradés en impliquant de nombreux acteurs locaux : Agence régionale pour l'Environnement – Agence régionale de la Biodiversité, Parc national des Calanques, Conservatoire botanique national méditerranéen, Aix-Marseille Université, Le Naturoscope, Conseil départemental des Bouches-du-Rhône, Ville de Marseille, Conservatoire du Littoral, Région Sud et Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement. Ce projet est intégrateur de la complexité du territoire du PNCal, premier parc national péri-urbain d'Europe, car il prend en compte à la fois les contraintes anthropiques comme une forte fréquentation d'usagers aux pratiques diverses, une contamination des sols héritée de son passé industriel, et les contraintes naturelles comme la xéricité liée au climat et la salinité apportée par les embruns.

Parmi les habitats littoraux d'intérêt communautaire fragmentés du territoire du PNCal, la « phrygane à Astragales de Marseille » (formation végétale Natura 2000 5410 : phryganes ouest-méditerranéennes) représente un exemple typique de cette situation littorale paradoxale. Cet habitat est structuré par l'Astragale de Marseille (*Astragalus tragacantha* L. ; Fig. 1), dont la persistance des populations est gravement compromise en raison de multiples menaces environnementales et anthropiques, historiques et actuelles. D'une part, les infrastructures urbaines (habitations, routes, chemins) ont engendré la destruction et la dégradation de la « phrygane à Astragale », son habitat favorable. D'autre part, les stress abiotiques (vents violents, salinité et xéricité élevées), les pollutions organiques et inorganiques notoires des eaux, sols et embruns issues du trafic maritime, des industries pétrolières et des rejets d'eaux usées traitées (Robert-Peillard *et al.* 2015), la fréquentation intense touristique et de loisirs et la compétition naturelle générée par les espèces végétales caractéristiques des garrigues littorales et/ou anthropisées via les espèces végétales exotiques envahissantes (ex. Griffes-de-sorcière, Agaves, Oponces), ont entraîné une régression démographique préoccupante (Affre *et al.* 2015). Néanmoins, *A. tragacantha* tolère des concentrations importantes d'éléments traces métalliques et métalloïdes (ETMM) dans les sols (Laffont-Schwob *et al.* 2011 ; Salducci *et al.* 2019). Cette tolérance pourrait s'expliquer par la particularité d'*A. tragacantha* de pouvoir établir deux types de symbioses racinaires (endomycorhizes à arbuscules et nodules à rhizobium) qui faciliteraient la séquestration des polluants au niveau du système racinaire et lui confèreraient aussi un avantage sélectif pour se développer dans ces sols

carencés en eau et nutriments (Laffont-Schwob *et al.* 2011). Il a également été observé la présence d'endophytes septés foncés (DSE) au sein de ses racines (Moussaoui 2011). Les DSE sont des champignons ubiquistes associés aux racines et peuvent être potentiellement considérés comme des champignons symbiotiques. Leur relation avec leur hôte n'est pas toujours claire et semble pouvoir aller du parasitisme au mutualisme selon les espèces impliquées et les conditions du milieu (Jumpponen 2001). Cependant, leur présence dans des habitats aux conditions extrêmes, notamment pollués, laisse présumer un rôle dans la protection des plantes en cas de stress abiotiques (Regvar *et al.* 2010). Ainsi, la présence de DSE pourrait favoriser la tolérance d'*A. tragacantha* aux ETMM présents dans les sols.

La présente étude décrit les travaux scientifiques préliminaires et structurants permettant d'éclairer les choix d'une opération de restauration écologique des populations d'*A. tragacantha* sur la zone littorale sud du territoire du PNCal. Ils concernent :

– le recensement, la répartition locale et l'état démographique des pieds d'*A. tragacantha* ;

– la caractérisation et la cartographie de zones d'habitats favorables au développement d'*A. tragacantha* ;

– la caractérisation de la contamination en ETMM des sols de surface illustrée par la cartographie de la concentration en contaminants et de l'indice de charge polluante (ICP).

Ces prérequis scientifiques ont participé aux choix d'itinéraires techniques pour la restauration des population d'*A. tragacantha* à partir de plantules associées à leurs symbiotes racinaires. Ces transplantations ont été réalisées dans les populations existantes afin de les renforcer, et dans de nouveaux sites favorables afin d'augmenter la connexion entre les populations – tout en favorisant la phytostabilisation la re-fonctionnalisation des sols contaminés. De plus, le rôle potentiel d'*A. tragacantha* en tant qu'ingénieur de l'écosystème sera souligné dans le contexte de la restauration écologique des habitats littoraux dégradés.

Cet article s'inscrit dans le cadre de la publication des Actes issus du 10e Colloque du Réseau d'Échanges et de Valorisation en Écologie de la Restauration (REVER) organisé à Paris en 2019 (Dutoit *et al.* 2021).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Bilan démographique des populations d'*Astragalus tragacantha*

Une campagne de terrain a été menée au cours de l'hiver 2018-2019 pour réaliser le recensement des pieds d'*A. tragacantha* sur tous les sites connus du sud-est de la France (de Marseille à la Seyne-sur-Mer) à partir des données centralisées dans le Système d'Information et de Localisation des Espèces natives et exotiques (SILENE) (Delauge *et al.* 2013). Pour chaque pied recensé, il a été effectué une mesure :

– du diamètre moyen de la partie aérienne (à partir de la mesure de la largeur la plus grande et de la largeur perpendiculaire à la première) qui sera désigné par la suite par « taille » et catégorisé en cinq classes (inférieur à 10 cm ; entre 10 et 50 cm ; entre 50 et 100 cm ; entre 100 et 200 cm ; supérieur à 200 cm) ;

– du taux de nécrose foliaire (pourcentage) selon quatre classes (inférieur à 10 % ; entre 10 et 50 % ; supérieur à 50 % ; individu mort).

L'ensemble des individus a été classé selon ces critères pour permettre de dresser un bilan de l'état des populations d'*A. tragacantha*.

Modélisation et cartographie des zones favorables à *Astragalus tragacantha*

Les pieds d'*A. tragacantha* se répartissent entre la proximité de la mer et le front de colonisation des fourrés pré-forestiers représentés en majorité par le Pistachier lentisque (*Pistacia lentiscus* L.), les filaires (*Phillyrea* spp.) et le Chêne kermès (*Quercus coccifera* L.), dans la tranche d'altitude située entre 0 et 45 mètres au-dessus du niveau de la mer. Ainsi, la qualité d'habitat (« Habitat suitability modeling ») d'*A. tragacantha* a été modélisée en utilisant la méthode implémentée dans le logiciel Maxent sur la base de trois variables topographiques : altitude, pente et exposition de la pente, issues d'un modèle numérique de terrain (MNT) précis à 0,5 mètre (source IGN). Maxent est une méthode d'apprentissage automatique qui déploie et combine différentes formes de modélisation statistique similaires aux méthodes de régression multiple, afin de modéliser la relation entre les variables et la présence de l'espèce dont on veut prédire l'habitat. Cette relation modélisée correspond à une courbe de réponse dont l'optimisation est basée sur le contraste existant entre le cadre de référence et la présence de l'espèce. Nous avons choisi la zone entre 0 et 45 mètres comme cadre de référence car c'est au sein de cette zone que les pieds existants d'*A. tragacantha* sont les plus présents, ce qui correspond aux habitats favorables. Une fois ajustées, les courbes de réponses sont utilisées pour extrapoler spatialement une probabilité de présence (de 0 à 1) et délivrer une carte de présence potentielle. Le résultat de Maxent, qui est une carte d'habitat potentiel, a été ensuite confronté à une carte d'occupation du sol, en sachant que les sites potentiels situés en zones d'habitation, sur des chemins, au sein d'une végétation fermée ou dans des zones déjà occupées par *A. tragacantha*, n'ont pas été pris en compte.

Étude de la contamination en ETMM des sols de surface

Des systèmes d'information géographique (SIG) ont été utilisés, à la fois dans le cadre de la méthodologie de définition de la zone d'inventaire des concentrations en ETMM et de la localisation des points de mesure, et pour la réalisation des différentes cartographies et l'analyse des résultats des mesures de concentrations en ETMM du sol : visualisation spatialisée des points de mesure et de leur concentration en ETMM, interpolations et visualisation spatialisée des gradients de concentration issue des interpolations. Dans le cadre de cette étude, les logiciels QGIS 2.2.0 Valmiera et QGIS 2.18.15, couplés aux extensions Python et GRASS, ont été utilisés pour le traitement des informations géographiques. Pour la mesure *in situ* des coordonnées géographiques des points d'inventaires, un GPS a été utilisé avec le système de coordonnées WGS84 (degrés décimaux, EPSG4326).

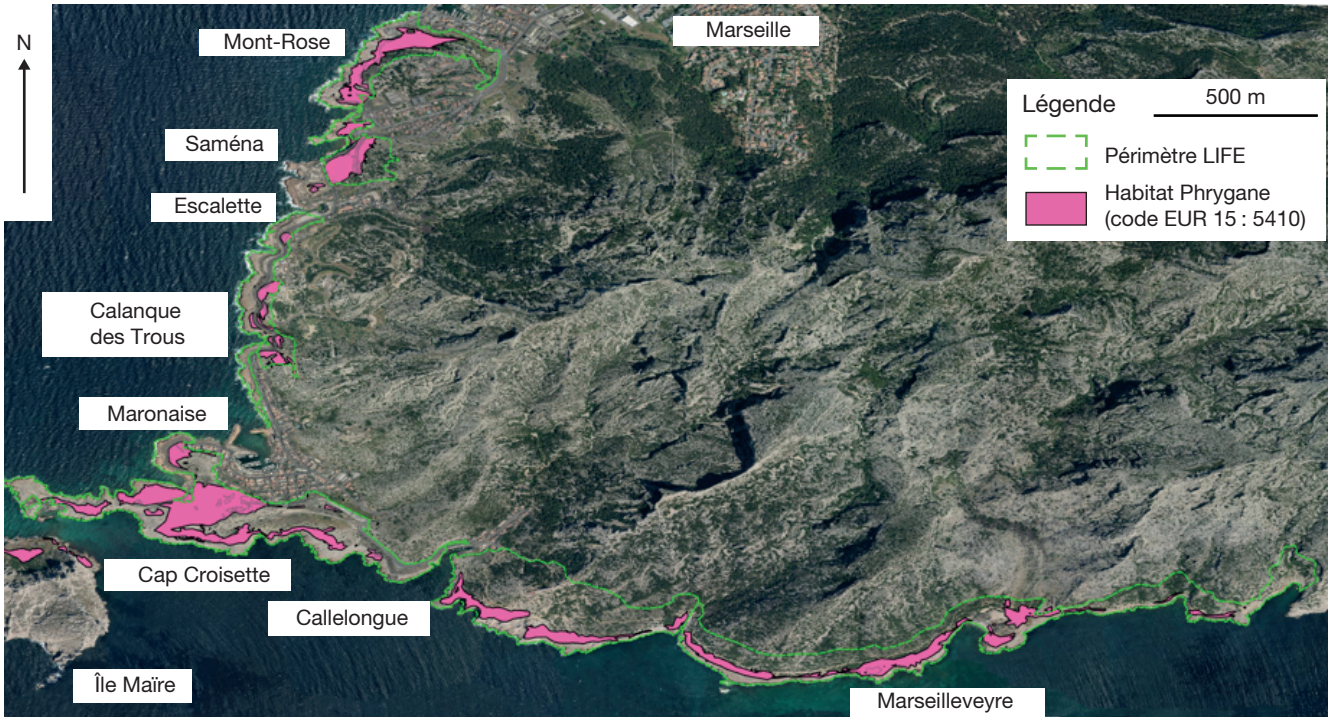

Fig. 2. — Répartition géographique de l'habitat « phryganes à Astragales » (Code EUR 15 : 5410) dans le périmètre du projet LIFE Habitats Calanques. Réalisation : Alma Heckenroth, Aix-Marseille Université, 2018. Sources : DOCOB PNCal 2017, LIFE Habitat Calanques, AMU. Fond cartographique : IGN, BD Ortho® 2014.

Définition du périmètre d'inventaire des concentrations en ETMM du sol de surface

Dans le périmètre du projet LIFE Habitats Calanques, les sites d'habitat 5410 « phryganes à Astragales » ont été cartographiés à partir des données issues du Document d'Objectifs (DOCOB 2017) (Fig. 2).

En s'appuyant sur les résultats préliminaires de modélisation des zones favorables à *A. tragacantha* concernant la probabilité de présence en fonction de l'altitude, l'inventaire des concentrations en ETMM a ensuite été réalisé pour l'ensemble des zones intra-population d'*A. tragacantha* (c'est-à-dire zones de présence avérée des populations) et des zones inter-population d'*A. tragacantha* (c'est-à-dire zones d'habitat favorable compris entre 0 et 45 m d'altitude) inclues dans le périmètre du projet LIFE Habitats Calanques (Fig. 3).

Disposition des points d'inventaire des concentrations en ETMM

Sur le périmètre d'inventaire des concentrations en ETMM du sol de surface (périmètre inter-population), des points d'inventaire ont été positionnés sur une grille de maille de 50 m, à raison d'un point de mesure au centre de chaque maille, soit 242 points de mesure. À l'issue de la campagne de terrain, ce sont 232 points d'analyse des ETMM du sol de surface qui ont été conservés. En effet, certains points inaccessibles, situés sur des surfaces bétonnées ou sur des surfaces rocheuses trop près du trait de côte où le sol de surface était absent, n'ont pas pu être intégrés à la campagne de mesure.

Analyse des concentrations en ETMM des sols de surface

Les teneurs en ETMM des sols de surface ont été analysées *in situ* à l'aide d'un analyseur élémentaire portatif de fluorescence X par dispersion d'énergie (Niton XL3T Goldd+), en plaçant directement la fenêtre de mesure de l'appareil au contact des sols, en ayant préalablement retiré la litière et les pierres pour dégager la surface du sol si nécessaire. Chaque point de mesure de la concentration des ETMM correspond à une analyse d'une durée de 60 secondes. Les mesures ont dû être réalisées par temps sec pour bénéficier de la plus grande fiabilité des mesures en condition de terrain (pas de séchage possible *in situ*).

Traitement SIG des données ETMM

Les données de la campagne de terrain, correspondant aux concentrations en ETMM des sols de surface et leurs coordonnées, ont été importées sous le logiciel QGIS. Afin d'obtenir une représentation cartographique continue des concentrations en ETMM des sols de surface, des interpolations utilisant la méthode de pondération par distance inverse (IDW) ont été réalisées pour chacun des cinq éléments considérés comme issus des activités industrielles (Affholder 2013 ; Laffont-Schwob *et al.* 2016) : arsenic (As), cuivre (Cu), plomb (Pb), antimoine (Sb), zinc (Zn). Les plantes poussant sur un sol contaminé doivent faire face aux effets conjugués de différents contaminants qui peuvent parfois avoir des effets cumulatifs ou synergiques, et qui peuvent même, sans être directement phytotoxiques, altérer la capacité des plantes à absorber les éléments essentiels. Ainsi, pour ces cinq ETMM, l'indice de charge polluante (ICP) a

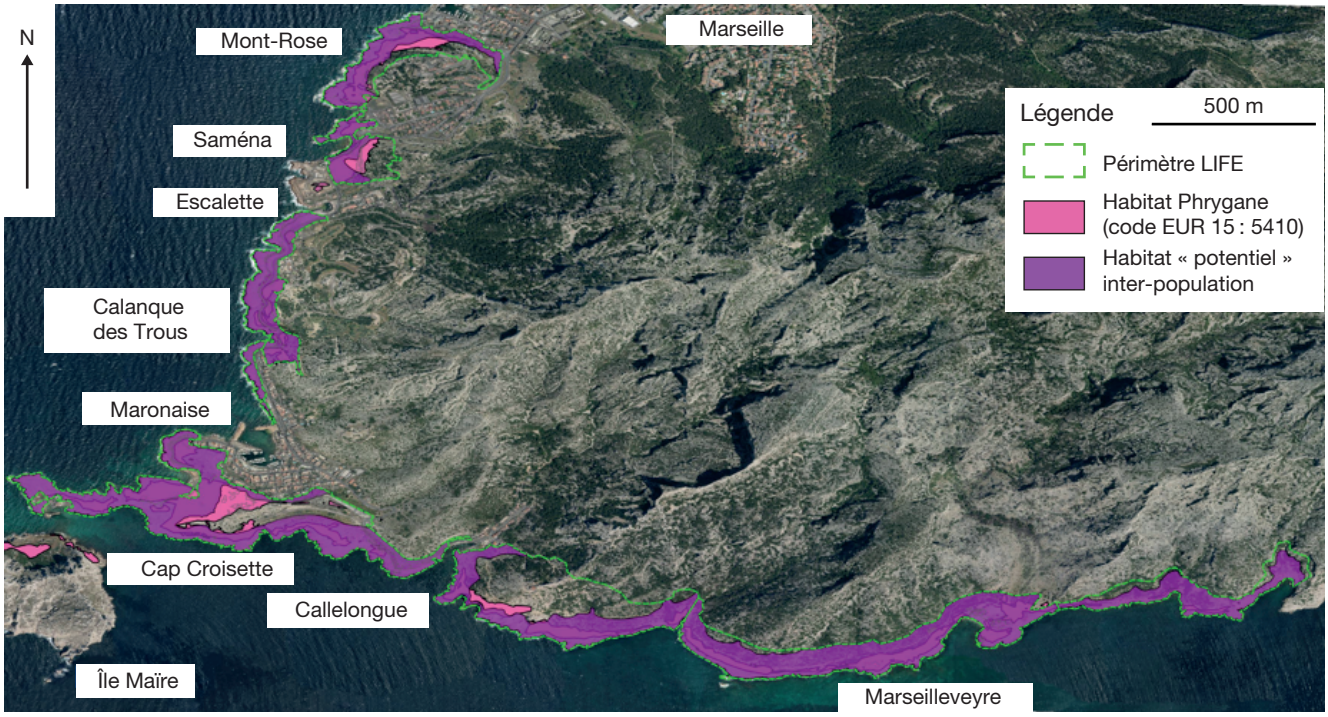

Fig. 3. — Périmètre inter-population d'*Astragalus tragacantha* L. correspondant aux habitats potentiels et défini comme la zone finale d'inventaire des concentrations en ETMM des sols de surface. Réalisation : Alma Heckenroth, Aix-Marseille Université, 2018. Sources : DOCOB PNCal 2017, LIFE Habitat Calanques, AMU. Fond cartographique : IGN, BD Ortho® 2014.

été calculé à partir des facteurs de contaminations (FC) de chaque élément. Les FC (FCx = concentration de l'élément x dans le sol/concentration du fond pédochimique local de ce même élément x, d'après Rashed [2010]) de chaque point de mesure ont été calculés en utilisant des données du fond local de contamination obtenues précédemment par Affholder *et al.* (2013, 2014). Les ICP ont été ensuite obtenus à partir de la formule de Rashed (2010) égale à la racine cinquième du produit des cinq FC correspondant à chacun des cinq éléments considérés.

RÉSULTATS

Astragalus tragacantha dans une dynamique régressive

Un total de 4919 pieds ont été recensés dont 2995 sont présents sur la partie continentale depuis Marseille jusqu'à la Seyne-sur-mer, en passant par la Ciotat, Saint-Cyr, Six-Fours-les-plages, et 1924 sont présents sur les archipels du Frioul et de Riou (îles de Pomègues, Ratonneau et Maïre) (Fig. 4). Ainsi, environ 90 % des effectifs d'*A. tragacantha* en France se rencontre dans le périmètre du PNCal.

Sur l'ensemble des 4919 pieds recensés, il existe une forte proportion de pieds adultes ayant une taille (diamètre moyen de la partie aérienne) comprise entre 50 et 100 cm (40,15 %) comparativement à une proportion beaucoup plus faible des juvéniles c'est-à-dire de taille inférieure à 10 cm (4,36 %) et des individus plus âgés de taille supérieure à 200 cm (3,28 %) (Fig. 5). Le très faible recrutement d'*A. tragacantha* est conforme à l'observation d'une quasi-absence de germination des graines (Fig. 6) et d'une survie des juvéniles extrêmement réduite dans ses populations naturelles.

Tous les pieds d'*A. tragacantha* présentent des nécroses foliaires (Figs 7, 8) avec une forte proportion des pieds (44,24 %) compris dans la classe 10-50 % de nécroses foliaires et 15,9 % des pieds dans les classes supérieures à 50 % de nécroses foliaires (un pied mort correspondant à 100 % de nécroses foliaires).

La combinaison la plus fréquente entre la taille et le taux de nécrose représente 19,7 % de pieds d'*A. tragacantha* avec une taille comprise entre 50 et 100 cm et une nécrose foliaire comprise entre 10 et 50 % (Fig. 9).

Sélection de zones futures de transplantation d'*Astragalus tragacantha*

Modélisation et cartographie des zones favorables à Astragalus tragacantha

Selon la méthode Maxent, l'altitude est la variable la plus importante pour prédire la présence d'*A. tragacantha*. Ainsi, la probabilité de présence d'*A. tragacantha* augmente très fortement de 0 à 10 mètres avec un maximum autour de 20 mètres et décroît ensuite avec une probabilité presque nulle à 30 mètres et nulle à 40 mètres d'altitude (Fig. 10).

Au final, sur la base des trois variables topographiques (altitude, pente et exposition), la carte de présence potentielle situe les habitats favorables pour *A. tragacantha* entre 5 et 20 m d'altitude, sur une pente inférieure à 45°, et



FIG. 4. — Répartition des pieds d'*Astragalus tragacantha* L. sur l'ensemble des sites du sud-est de la France méditerranéenne.

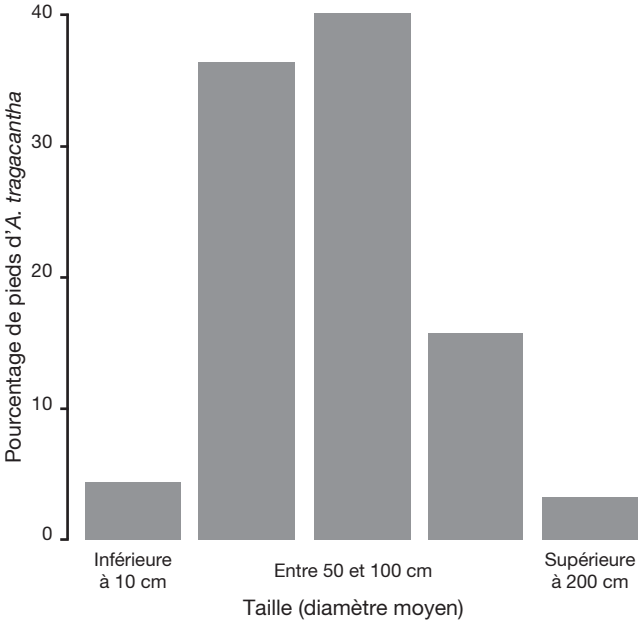

FIG. 5. — Répartition des classes de taille (diamètre moyen en cm de la partie aérienne) des pieds d'*Astragalus tragacantha* L.



FIG. 6. — Photographie d'une plantule d'*Astragalus tragacantha* L. avec ses deux cotylédons et premières vraies feuilles prise le 7 mars 2011 à Callelongue. Crédit photo : I. Laffont-Schwob.

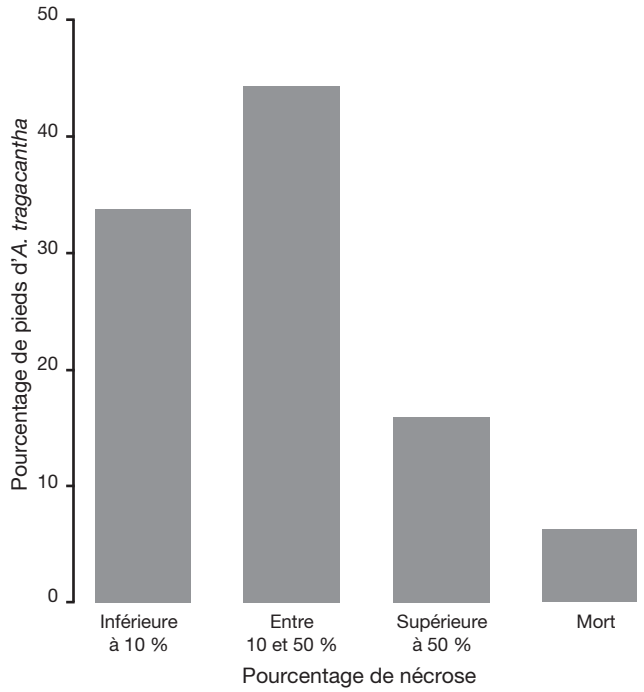

FIG. 7. — Répartition du pourcentage des nécroses foliaires pour les pieds d'*Astragalus tragacantha* L.

principalement orientée à l'ouest (Fig. 11). Les probabilités de présence d'*A. tragacantha* supérieure à 70 % ne sont pas réparties de manière continue et sont souvent situées en zones construites (ex. Calanque de Callelongue). Finalement, 11 zones favorables au développement d'*A. tragacantha* (Fig. 11) ont pu être définies dans la zone d'étude du LIFE Habitats Calanques. Cinq zones favorables sont très proches des occurrences actuelles d'*A. tragacantha* et les six autres zones favorables sont situées dans la partie sud-est où l'occurrence actuelle d'*A. tragacantha* est plus réduite. Ces six zones pourront donc correspondre à des sites d'introduction des plantules d'*A. tragacantha*, ce qui permettrait de réduire la fragmentation de ces habitats et d'augmenter la connexion entre les populations. Parmi ces six zones,



Fig. 8. — Photographie d'un individu d'*Astragalus tragacantha* L. nécrosé à la base, prise le 1er avril 2016 à la Maronaise. Crédit photo : I. Laffont-Schwob.

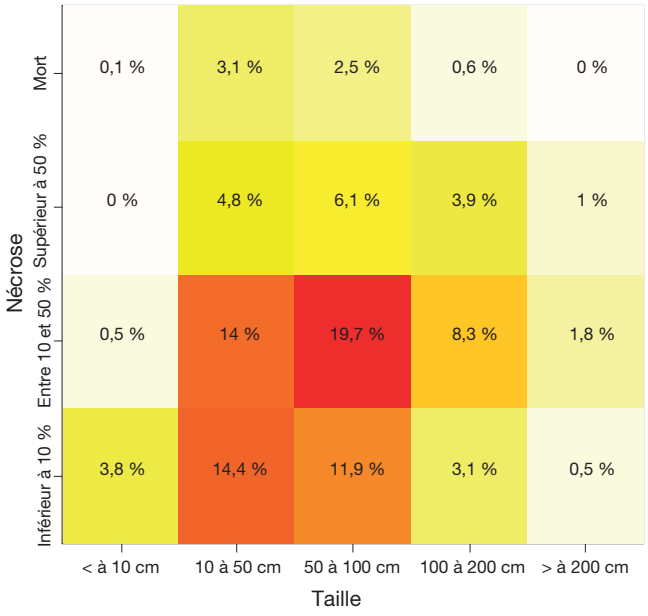

Fig. 9. — Pourcentages de pieds d'*Astragalus tragacantha* L. par classe de taille (diamètre moyen de la partie aérienne) et par classe de nécrose foliaire.

deux d'entre elles, situées à la limite est de la zone d'étude, pourront être considérées comme une possibilité d'étendre l'aire de répartition d'*A. tragacantha*.

Cartographie d'un indice de pollution : l'ICP

Les concentrations en ETMM des sols de surface doivent être utilisées à titre indicatif du fait de l'importante hétérogénéité spatiale de ces concentrations sur site (Fig. 12 ; Tableau 1), et notamment sur les zones de plus forte contamination (Heckenroth *et al.* 2016). Cette hétérogénéité est fortement liée au type d'activité industrielle responsable de la contamination en ETMM des sols (verrerie de Montredon, fonderies de plomb de l'Escalette et des Goudes, usines de « soude » [carbonate de sodium] de Saména, de Callelongue et de Sormiou, usine de soufre et de « soude » des Goudes).

Globalement, sur la zone littorale qui correspond à l'habitat potentiel d'*A. tragacantha*, la contamination des sols de surface semble plus importante pour les éléments arsenic (As), plomb (Pb) et antimoine (Sb), que pour les éléments cuivre (Cu) et zinc (Zn) (Tableau 1). Il est également important de préciser que la contamination en As, Pb et Sb (éléments d'origine industrielle) sur la zone d'étude apparaît diffuse dans les sols de surface en dehors des zones de dépôt des déchets industriels. Pour une question de simplification, seule la carte des ICP est présentée (Fig. 12). Les points de plus forte contamination sont localisés sur les mêmes zones pour tous les contaminants mesurés, notamment sur des points situés au sud de l'Escalette.

Ces points apparaissent clairement sur la carte des ICP qui sont des indices de multi-contamination dont toute valeur supérieure à 1 indique une contamination avérée des sols (Fig. 12). Certaines des zones pour lesquelles les sols sont les plus contaminés correspondent à des zones adjacentes de dépôts massifs de scories, notamment au niveau du site de Callelongue (remblais constituant les soubassements routiers).

Mise en regard des cartographies d'habitats favorables et d'ICP

Les concentrations en ETMM mesurées sur les futurs sites de transplantation d'*A. tragacantha* pour la restauration de ses populations n'étaient théoriquement pas limitatives à la croissance des Astragales, car toujours inférieures aux concentrations testées en conditions de laboratoire dans des études préliminaires (Laffont-Schwob *et al.* 2011). Huit sites de renforcement ont finalement été définis dans les zones intra-population (c'est-à-dire zones de présence avérée des populations) d'*A. tragacantha* ainsi que quatre sites d'introduction dans les zones inter-population d'*A. tragacantha* (c'est-à-dire zones d'habitat favorable) (Fig. 13). Les huit sites de renforcement correspondent aux habitats où l'occurrence d'*A. tragacantha* est la plus importante et sont situés au Mont Rose, Saména, Escalette, Calanque des Trous, Goudes, Maronaise, Cap Croisette et Marseilleveyre. Les quatre sites d'introduction, Sémaphore, Mounine, Batterie Marseilleveyre et Queyrons (Fig. 13), sont situés dans la partie sud-est de la zone d'étude, de part et d'autre du site de renforcement Marseilleveyre, ce qui permet de réduire l'isolement des populations d'*A. tragacantha* et d'augmenter leur connectivité, sachant que le site d'introduction Queyrons permet d'élargir son aire de répartition dans la zone d'étude péri-marseillaise.

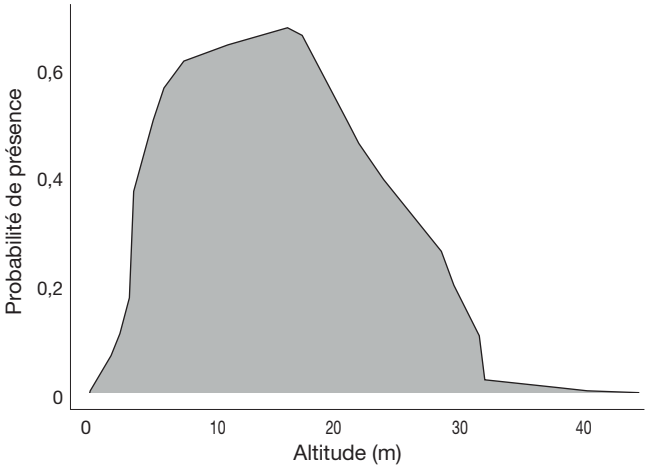

FIG. 10. — Courbe de réponse de l'altitude (en mètres au-dessus du niveau de la mer) obtenue avec la méthode Maxent sur la base de 2019 points de présence de pieds d'*Astragalus tragacantha* L.

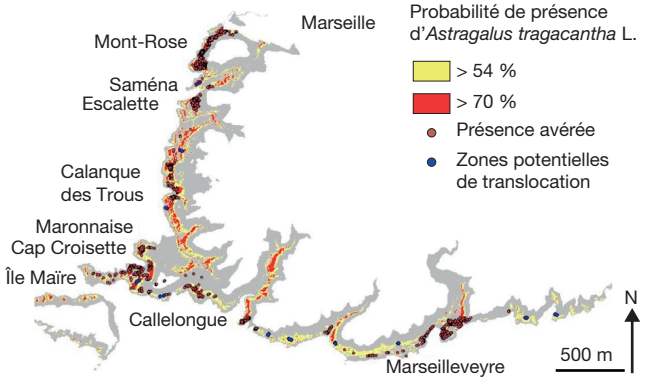

FIG. 11. — Carte de probabilité de présence d'*Astragalus tragacantha* L. selon deux classes (supérieure à 54 % en jaune et supérieure à 70 % en rouge). Les points en orange correspondent aux présences d'*A. tragacantha* et les points en bleu à des zones potentielles de transplantation des plantules après avoir enlevé les zones construites, les chemins et les zones occupées par une végétation dense.

TABLEAU 1. — Concentrations des sols de surface en ETMM (mg/kg) mesurées par fluorescence X portable sur le périmètre correspondant à l'habitat potentiel (zone inter-population) d'*Astragalus tragacantha* L. Abréviations : **AS**, arsenic ; **Cu**, cuivre ; **Pb**, plomb ; **Sb**, antimoine ; **Zn**, zinc ; *, le bruit de fond local correspond aux concentrations mesurées dans les sols du massif des Calanques et définies comme bruit de fond local par Affholder *et al*. (2013, 2014).

	Concentration des sols de surface en ETMM (mg.kg^{-1})				
	As	**Cu**	**Pb**	**Sb**	**Zn**
Bruit de fond local*	5	7,5	43	3	66
Min	21	22	53	23	32,5
Médiane	54	48	203	65	154
Moy ± SD	68 ± 50	65 ± 59	439 ± 891	95 ± 75	333 ± 771
Max	417	376	8326	276	8802

DISCUSSION

Si la restauration des habitats constitue une bonne approche pour conserver les espèces menacées, chez les plantes, la dispersion limitée des diaspores, les banques de graines transitoires du sol et d'autres facteurs font que le renouvellement spontané des populations végétales dans des habitats restaurés est difficile voire impossible (Godefroid *et al.* 2011). Une mesure de restauration plus efficace pour conserver les plantes menacées consiste en la translocation d'individus, c'est-à-dire l'enlèvement volontaire d'individus de populations naturelles dans le but d'établir une nouvelle population (introduction), de ré-établir une population disparue (ré-introduction) ou d'augmenter une population établie (renforcement) (Menges 2008). La translocation d'individus sous forme de graines comparativement aux plantules se traduit par un taux de succès extrêmement réduit (Menges 2008). Ainsi, le choix de réaliser la translocation sur la base de la transplantation de plantules d'*A. tragacantha* dans le Projet LIFE Habitats Calanques est tout à fait pertinent. Cependant, le choix des sites où la translocation des plantules d'*A. tragacantha* devra être réalisée restait à définir au regard des zones d'habitats favorables et des contaminations en ETMM du sol de surface, de manière à optimiser le succès de la restauration écologique des populations d'*A. tragacantha*.

Dans le cadre de précédentes expérimentations réalisées au laboratoire, des plantules d'*A. tragacantha* avaient été cultivées dans des sols prélevés sur la zone littorale concernée par le projet LIFE Habitats Calanques, suivant un gradient de contamination en ETMM allant de 90 à 3050 mg.kg^{-1} de plomb, 21 à 98 mg.kg^{-1} d'arsenic et de non détecté à 112 mg.kg^{-1} d'antimoine (Laffont-Schwob *et al.* 2011 ; Salducci *et al.* 2019). Elles avaient permis de mettre en avant :

– la capacité de cette plante à se développer sur des sols contaminés par ces éléments ;

–l'absence de différence de croissance des plantules âgées de deux ans entre les cultures sur sol contaminé de l'Escalette et sur un sol de référence constitué de terreau.

Ces travaux indiquent la bonne tolérance d'*A. tragacantha* aux types de pollution présentes le long du littoral dans le PNCal grâce à sa capacité à former des associations symbiotiques racinaires bactériennes (Laffont-Schwob *et al.* 2011). En complément, les travaux de Moussaoui (2011) ont permis de montrer une allocation préférentielle des concentrations en ETMM dans les racines d'*A. tragacantha* par rapport aux parties aériennes après six mois de culture dans des sols prélevés sur deux sites littoraux du territoire du PNCal, l'un fortement contaminé, celui de l'Escalette, l'autre moins affecté par la pollution, celui de la Maronaise. Ces résultats vont dans le sens d'une phytostabilisation des

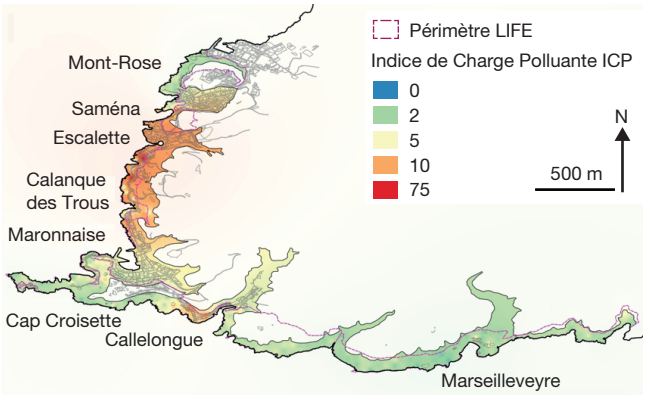

Fig. 12. — Cartographie des Indices de Charge Polluante (ICP) des sols de surface calculés à partir des facteurs de contamination de l'arsenic, du cuivre, du plomb, de l'antimoine et du zinc sur la zone d'étude du LIFE Habitats Calanques. Réalisation : Alma Heckenroth, Aix-Marseille Université, 2018. Sources : LIFE Habitat Calanques, occupation du sol créé par Pierre-Jean Dumas. 12

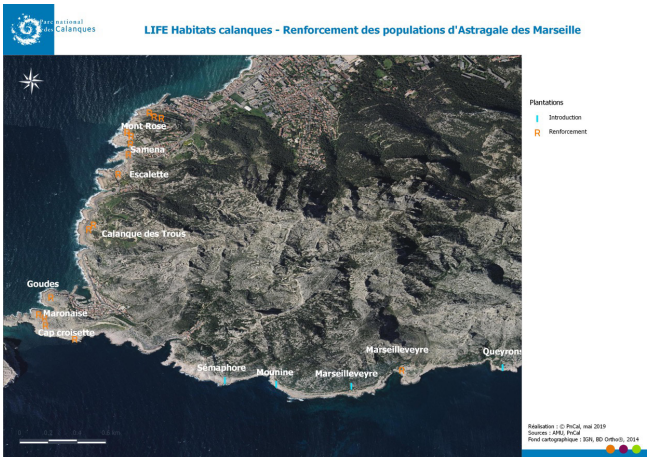

Fig. 13. — Sites sélectionnés pour l'opération de restauration écologique des populations d'*A. tragacantha* L. par transplantation de plantules : huit sites de renforcement Mont Rose, Saména, Escalette, Calanque des Trous, Goudes, Maronaise, Cap Croisette et Marseilleveyre (en orange) et quatre sites d'introduction Sémaphore, Mounine, Batterie Marseilleveyre et Queyrons (en bleu). Crédit : Laureen Keller. Source : Parc national des Calanques.

ETMM par *A. tragacantha*. Pour aller plus loin, les présents travaux, réalisés *in situ* sur une importante étendue de l'aire de répartition de l'*A. tragacantha* sur le territoire du PNCal (autour du massif de Marseilleveyre), ont permis de confirmer que la majorité de ses populations se développent sur des sols contaminés en ETMM.

À la lumière des résultats issus des expériences précédentes en laboratoire et des analyses cartographiques de l'ICP et des zones d'habitat favorable en situation de terrain, des choix de gestion conservatoire ont pu être élaborés. Ils ont consisté à inclure certaines zones contaminées du littoral dans le projet de restauration des populations d'*A. tragacantha*, dans la mesure où les concentrations en ETMM des sols atteintes *in situ* ne dépassent pas celles testées en conditions de laboratoire. Ainsi, la restauration des populations d'*A. tragacantha* sur des sols contaminés dans le cadre du projet LIFE Habitats Calanques permettra de favoriser la fixation biologique des ETMM des sols et limitera leur transfert dans le sol, l'air et l'eau. Une attention particulière sera également portée aux symbiotes racinaires d'*A. tragacantha* lors de la transplantation des plantules – sachant l'importance de ces types d'interaction symbiotique dans le succès des translocations de plantes, particulièrement dans des sites fortement dégradés en milieu méditerranéen (Brunel *et al.* 2007).

CONCLUSION

Ces travaux préparatoires ont permis d'éclairer les choix de gestion conservatoire pour la restauration écologique des populations d'*A. tragacantha*, et par là de son habitat d'intérêt communautaire les « phryganes à Astragale ». Cette étude met en lumière le lien nécessaire et d'intérêts réciproques entre recherche et gestion. Il s'agit d'appuyer les décisions de gestion sur des résultats solides issus d'une démarche scientifique et interdisciplinaire sur un territoire complexe. Pour le projet LIFE Habitats Calanques, les différentes études scientifiques ont permis de faire le choix de la transplantation de plantules avec leurs symbiotes racinaires, des sites de translocation et à l'avenir de définir des méthodes d'évaluation du succès de ces translocations *in situ* et à grande échelle. Enfin, cette opération de mise en place d'une restauration écologique met en évidence les enjeux de gestion croisés, notamment liés aux contaminations industrielles sur la zone littorale du territoire du PNCal dont dépend le succès de la préservation d'*A. tragacantha*.

Remerciements

Nous remercions l'Union européenne pour son soutien financier du projet LIFE Habitats Calanques (LIFE16 NAT/FR/000593, 2017-2022), le Conseil départemental des Bouches du Rhône, la Ville de Marseille et la SCI Les Goudes en tant que principaux propriétaires fonciers des sites d'étude, ainsi que le Parc national des Calanques et l'Agence régionale pour l'Environnement-Agence régionale de la Biodiversité pour leur coordination du projet LIFE Habitats Calanques. Nous remercions également Xavier Dauvergne et Sandra Malaval pour leurs précieux conseils qui ont permis d'améliorer cet article.

RÉFÉRENCES

Affholder M. C. 2013. — *Approche des mécanismes de tolérance du romarin aux éléments traces métalliques et métalloïdes : perspectives pour une phytostabilisation des sols méditerranéens pollués*. Thèse de Doctorat, Aix-Marseille Université, Marseille, 325 p.

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., Borla A., Demelas C. & Prudent P. 2014. — As,

Pb, Sb, and Zn transfer from soil to root of wild rosemary: do native symbionts matter? *Plant and 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. — Le recul stratégique : atouts et risques pour la biodiversité dans un contexte péri-urbain. *Vertigo* Hors-Série 21: 1-13.

BENOIT G. & COMEAU A. 2005. — La Méditerranée et ses dynamiques de développement, *in* BENOIT G. & COMEAU A. (éds), *Méditerranée, Les perspectives du Plan Bleu sur l'environnement et le développement.* L'Aube/Plan Bleu, La Tour d'Aigues/Marseille: 11-68.

BRUNEL B., DOMERGUE O., MAURE L., BRAHIC P., GALIANA A., JOSA R., LAJUDIE P. DE, ATTALLAH T., RISK H., EL-HAJJ S. E. & CLEYET-MAREL J. C. 2007. — Potentialité des associations symbiotiques plantes-micro-organismes pour réhabiliter des sites fortement dégradés en milieu méditerranéen. *Cahiers Agricultures* 16 (4): 324-329. https://doi.org/10.1684/agr.2007.0116

CLAYES C., CONSALES J. N. & BARTHELEMY C. 2014. — Marseille et ses natures : un jardin méditerranéen à l'échelle d'une ville, *in* CHARLES L., LANGE H., KALAORA B. & RUDOLF F. (éds), *Environnement et sciences sociales en France et en Allemagne.* L'Harmattan, Paris: 411-430.

DELAUGE J., MEYER D., NOBLE V. & CHONDROYANNIS P. 2013. — Le portail des données naturalistes SILENE en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. *Netcom* 27 (1-2): 245-253.

DOCOB 2017. — *Document d'Objectif du site Natura 2000 FR9301602 « Calanques et îles marseillaises – Cap Canaille et massif du Grand Caunet »*. Parc national des Calanques, Marseille, 2 p.

DUTOIT T., GALLET S., HECKENROTH A. & BUISSON É. 2021. — 2008-2019, plus d'une décennie d'échanges et de débats au-tour de la restauration écologique en France, *in* GOURDAIN P. (éd.), REVER 10 – 10e Colloque du Réseau d'Échange et de Valorisation en Écologie de la Restauration, Paris, 19-21 mars 2019. *Naturae* 2021 (19): 271-276. https://doi.org/10.5852/naturae2021a19

GODEFROID S., PIAZZA C., ROSSI G., BUORD S., STEVEN A.-D., AGURAIUJA R., COWELL C., WEEKLEY C. M., VOGG G., IRIONDO J. M., JOHNSON I., DIXON B., GORDON D., MAGNANON S., VALENTIN B., BJUREKE K., KOOPMAN R., VICENS M., VIREVAIRE M. & VANDERBORGHT T. 2011. — How successful are plant species reintroductions? *Biological Conservation* 144 (2): 672-682. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.10.003

HECKENROTH A., RABIER J., DUTOIT T., TORRE F., PRUDENT P. & LAFFONT-SCHWOB I. 2016. — 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

INSEE 2020. — *Comparateur de territoire. Intercommunalité – Métropole de Métropole d'Aix-Marseille-Provence.* https://www.insee.fr/fr/statistiques/1405599?geo=EPCI-200054807, dernière consultation en février 2020.

JUMPPONEN A. 2001. — Dark septate endophytes – are they mycorrhizal? *Mycorrhiza* 11: 207-211. https://doi.org/10.1007/s005720100112

KALAORA B. 2010. — *Rivages en devenir : de nouveaux horizons pour le Conservatoire du Littoral.* La Documentation Française, Paris, 279 p.

LAFFONT-SCHWOB I., DUMAS P. J., PRICOP A. D., RABIER J., MICHE L., AFFRE L., MASOTTI V., PRUDENT P. & TATONI T. 2011. — Insights on metal tolerance and symbionts of the rare species *Astragalus tragacantha* aiming at phytostabilization of polluted soils and plant conservation, *in* DUTOIT T. (éd.), Numéro spécial, 7e conférence européenne SER en écologie de la restauration, 23-27 août 2010, Avignon, France. *Ecologia Mediterranea* 37: 57-62. https://doi.org/10.3406/ecmed.2011.1338

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.* REF2C, Aix-en-Provence: 204-247.

MENGES E. S. 2008. — Restoration demography and genetics of plants: when is a translocation successful? *Australian Journal of Botany* 56 (3): 187-196. https://doi.org/10.1071/BT07173

MERCKELBAGH A. 2009. — *Et si le littoral allait jusqu'à la mer! La politique du littoral sous la Ve république*. Éditions Quae, Versailles, 351p.

MOUSSAOUI L. 2011. — *Étude des interactions symbiotiques d'*Astragalus tragacantha*, espèce rare et protégée, dans la perspective de mieux comprendre la survivance de l'espèce sous perturbations anthropiques.* M2R – BIOECO, Master SET, Université Aix-Marseille III, Marseille, 55 p.

RASHED M. N. 2010. — Monitoring of contaminated toxic and heavy metals, from mine tailings through age accumulation, in soil and some wild plants at Southeast Egypt. *Journal of Hazardous Materials* 178 (1-3): 739-746. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.01.147

REGVAR M., LIKAR M., PILTAVER A., KUGONI 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 and Soil* 330 (1): 345-56. https://doi.org/10.1007/s11104-009-0207-7

ROBERT-PEILLARD F., SYAKTI A. D., COULOMB B., DOUMENQ P., MALLERET L., ASIA L. & BOUDENNE J. L. 2015. — Occurence and fate of selected surfactants in seawater at the out fall of the Marseille urban sewage system. *International Journal of Environmental Science and Technology* 12 (5): 1527-1538. https://doi.org/10.1007/s13762-014-0577-0

SALDUCCI M. D., FOLZER H., ISSARTEL J., RABIER J., MASOTTI V., PRUDENT P., AFFRE L., HARDION L., TATONI T. & LAFFONT-SCHWOB I. 2019. — How can a rare protected plant cope with the metal and metalloid soil pollution resulting from past industrial activities? Phytometabolites, antioxidant activities and root symbiosis involved in the metal tolerance of *Astragalus tragacantha*. *Chemosphere* 217: 887-896. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.078

Soumis le 14 mai 2020 ;
accepté le 9 octobre 2021 ;
publié le 9 février 2022.